

# ANSYS 有限元分析 与工程应用

蒋春松 孙 浩 朱一林 等编著  
栗思科 审 校

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

## 内 容 简 介

以往介绍 ANSYS 应用实例的书籍, 要么只给出 GUI 操作路径, 要么只给出命令流, 或者虽然同时给出 GUI 操作路径和命令流, 但是大多是用 GUI 操作路径分析完成后再附上实例的命令流, 相互之间没有对应衔接, 不便于学习。为此, 本书按照 GUI 界面操作和命令流相结合的方式, 帮助用户掌握大型通用有限元软件 ANSYS 及其在各专业领域的应用, 提高 GUI 界面操作能力, 读懂命令流直至具备独立编写命令流能力。

本书共分为 8 章, 主要内容包括: ANSYS13.0 概述; ANSYS 分析的基本步骤, 即分析问题、建立几何模型、创建有限元模型、施加载荷、求解, 以及后处理分析; 线性静力分析; 热学分析; 动力学分析; 非线性分析; 疲劳断裂问题分析; 优化设计。

本书适用于 ANSYS 软件的初、中级用户, 以及有初步使用经验的技术人员, 也可作为理工科院校相关专业的高年级本科生、研究生及教师学习 ANSYS 软件的培训教材, 也可以作为从事相关领域科学技术研究的工程技术人员学习和使用 ANSYS 软件的参考书。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有, 侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

ANSYS 有限元分析与工程应用 / 蒋春松等编著. —北京: 电子工业出版社, 2012.8

ISBN 978-7-121-17819-1

I. ①A… II. ①蒋… III. ①有限元分析—应用程序 IV. ①O241.82

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 179328 号

责任编辑: 桑 昀

印 刷:

装 订:

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 30 字数: 771.2 千字

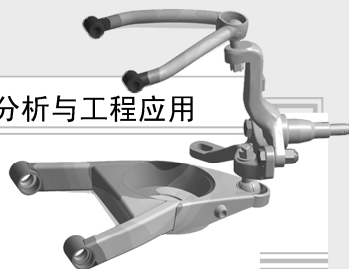
印 次: 2012 年 8 月第 1 次印刷

印 数: 4 000 册 定价: 59.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 [zlts@phei.com.cn](mailto:zlts@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

服务热线: (010) 88258888。



# 前 言

ANSYS 软件是融合结构、流体、电场、磁场和声场分析于一体的大型通用有限元分析软件，广泛应用于土木工程、地质矿产、水利、汽车工程、机械制造、航空航天、核工程等一般工业及科学研究。为了帮助用户更好地掌握 ANSYS 应用，本书以最新版 ANSYS13.0 为平台，介绍了 ANSYS 的基本使用方法，包括建模、网格划分、施加载荷、求解及后处理等，并结合热点研究课题中的实例来详细讲述 ANSYS 在工程中的具体应用。

本书从实际应用出发，在介绍 GUI 操作的同时，还在旁边给出命令流，即每一步操作后都从 Sessions Editor 中提取和修改相对应的命令代码，这样使读者不仅掌握了 ANSYS 软件 GUI 操作，而且也懂得命令流是如何方便获取的，进而学会如何去编辑和使用命令流，达到双重学习效果。以往的应用实例要么只给出 GUI 操作，要么只给出命令流，或者虽然 GUI 和命令流均给出，但都是在 GUI 操作分析完之后再附上实例的命令流，相互之间没有对应衔接，不便于学习。

## 本书特色

本书特色在于将 GUI 和命令流同步对应给出，即每一步操作后都打开 Sessions Editor 提取和修改相对应的命令代码。在学习 GUI 操作的同时，一起学习了命令流，从而更容易理解和使用命令流。通过这种交互的方式能够加深理解，提高学习效果。

## 组织结构

本书分为 8 章：第 1 章简要概述了有限元方法的基本理念、技术特点，以及基本操作步骤；第 2 章详细介绍了有限元分析的一般步骤，包括建立几何模型、划分网格、施加载荷、求解设置及后处理分析；第 3 章介绍了线性静力分析的基本过程，包括杆系结构、梁结构和板壳结构的定义，以及在 ANSYS 中相应的常用单元；第 4 章介绍了热力学分析的基本过程，详细介绍了稳态热分析、瞬态热分析、热辐射分析和相变热分析；第 5 章主要介绍动力学分析，详细介绍了模态分析、谐响应分析、瞬态动力学分析，以及谱分析；第 6 章介绍了非线性分析，包括几何、材料和状态非线性分析；第 7 章讨论了疲劳断裂问题分析，详细介绍如何计算应力强度因子和 J 积分；第 8 章介绍了优化设计的基本过程，包括优化设计概述和优化设计的基本步骤。

## 适用对象

□ ANSYS 软件的初、中级用户，以及有初步使用经验的技术人员。

- ❑ 理工科院校相关专业的高年级本科生、研究生及教师，作为学习 ANSYS 软件的培训教材。
- ❑ 从事相关领域科学技术研究的工程技术人员，作为学习和使用 ANSYS 软件的参考书。
- ❑ 高等院校理工科相关专业教师和学生。

### 编者与致谢

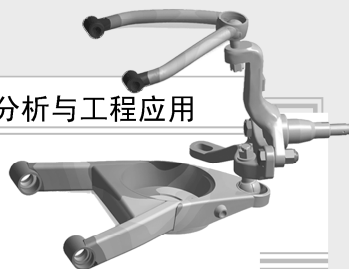
本书由蒋春松、孙浩、朱一林等编著，粟思科审校，蒋春松统稿。王治国、张宇、刘昌龙、罗会亮、巩鹏飞、徐伟、陈龙、钟晓林、王娟、胡静、杨龙等人参与了编写工作，在此一并表示感谢。

### 配套服务——ANSYS 俱乐部

我们为 ANSYS 读者和用户尽心服务，围绕 ANSYS 技术、产品和项目市场，探讨 ANSYS 应用与发展，发掘热点与重点，开展 ANSYS 教学。ANSYS 俱乐部 QQ: 183090495，电子邮箱: bojiakeji@tom.com，欢迎 ANSYS 爱好者和用户联系。本书提供部分内容的命令流，有需要的读者可登录华信教育资源网（[www.hxedu.com.cn](http://www.hxedu.com.cn)）免费下载。由于作者水平所限，加之有限元软件 ANSYS 应用面广泛，书中不妥之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

编 著 者





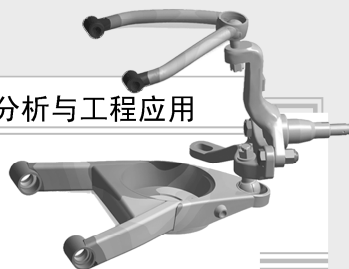
# 目 录

第 1 章 ANSYS13.0 概述 .....	(1)	2.2.2 自顶向下建模方法 .....	(28)
1.1 有限元方法简介 .....	(1)	2.2.3 实体模型的布尔操作 .....	(32)
1.1.1 有限元方法的基本思想 .....	(1)	2.2.4 从其他系统导入模型 .....	(45)
1.1.2 有限元方法特点 .....	(1)	2.3 创建有限元模型 .....	(47)
1.1.3 有限元分析基本步骤 .....	(2)	2.3.1 设定单元属性 .....	(47)
1.2 ANSYS 产品简介 .....	(2)	2.3.2 网格划分控制 .....	(54)
1.2.1 ANSYS 系列产品发展 过程 .....	(2)	2.3.3 自由网格划分与映射 网格划分 .....	(59)
1.2.2 ANSYS13.0 技术特点 .....	(3)	2.3.4 网格质量检查和修改 .....	(60)
1.2.3 ANSYS13.0 功能创新 .....	(3)	2.3.5 直接生成单元网格的 方法 .....	(62)
1.2.4 ANSYS13.0 使用环境 .....	(6)	2.4 施加载荷 .....	(64)
1.2.5 ANSYS13.0 软件功能 .....	(6)	2.4.1 载荷概述 .....	(64)
1.2.6 ANSYS13.0 文件系统 .....	(8)	2.4.2 施加载荷 .....	(68)
1.3 ANSYS13.0 的基本操作 .....	(9)	2.4.3 设定载荷步选项 .....	(75)
1.3.1 ANSYS13.0 启动 .....	(9)	2.5 求解 .....	(78)
1.3.2 ANSYS13.0 用户界面 .....	(10)	2.5.1 求解器 .....	(79)
1.3.3 ANSYS13.0 退出 .....	(12)	2.5.2 求解多步载荷 .....	(80)
1.4 ANSYS13.0 典型分析过程 .....	(13)	2.5.3 求解注意事项 .....	(82)
1.4.1 前处理 .....	(13)	2.6 后处理 .....	(83)
1.4.2 加载求解 .....	(13)	2.6.1 后处理概述 .....	(83)
1.4.3 后处理 .....	(13)	2.6.2 通用后处理器 .....	(83)
1.5 ANSYS13.0 的帮助文件 .....	(14)	2.6.3 时间历程后处理器 .....	(85)
本章小结 .....	(15)	2.7 工程实例：简单台柱静力分析 .....	(86)
思考题 .....	(16)	2.7.1 问题描述 .....	(86)
常见疑难问题解析 .....	(16)	2.7.2 问题分析 .....	(86)
		2.7.3 求解步骤 .....	(86)
第 2 章 ANSYS 分析的基本步骤 .....	(17)	2.7.4 简单台柱静力分析完 整命令流 .....	(95)
2.1 分析问题 .....	(17)	本章小结 .....	(96)
2.2 建立几何模型 .....	(17)		
2.2.1 自底向上建模方法 .....	(18)		

思考题 .....	(96)	4.1.2 热学分析的分类 .....	(151)
常见疑难问题解析 .....	(96)	4.1.3 热学分析的基本材料 属性 .....	(151)
<b>第3章 线性静力分析</b> .....	(98)	4.1.4 热学分析的边界条件 .....	(152)
3.1 线性静力分析基本过程 .....	(98)	4.1.5 热学分析参数符号和 单元 .....	(153)
3.1.1 静力分析概述 .....	(98)	<b>4.2 稳态热分析</b> .....	(154)
3.1.2 线性静力分析基本 步骤 .....	(99)	4.2.1 稳态热分析概述 .....	(154)
3.2 杆系结构静力分析 .....	(102)	4.2.2 实例分析: 实心圆柱体的 稳态热传导过程分析 .....	(154)
3.2.1 杆系结构的定义 .....	(102)	4.2.3 实心圆柱体的稳态热传导 过程分析完整命令流 .....	(165)
3.2.2 ANSYS 常用的杆单元 .....	(102)	<b>4.3 瞬态热分析</b> .....	(166)
3.2.3 实例分析: 人字形屋架 的静力分析 .....	(103)	4.3.1 瞬态热分析概述 .....	(167)
3.3 梁结构静力分析 .....	(115)	4.3.2 实例分析: 平板对接焊 过程模拟 .....	(167)
3.3.1 梁结构的定义 .....	(115)	4.3.3 平板对接焊过程模拟完 整命令流 .....	(179)
3.3.2 ANSYS 常用的梁单元 .....	(115)	<b>4.4 热辐射分析</b> .....	(184)
3.3.3 实例分析: 工字截面梁 平面弯曲分析 .....	(115)	4.4.1 热辐射分析概述 .....	(184)
3.4 板壳结构静力分析 .....	(125)	4.4.2 实例分析: 黑体热辐射 分析 .....	(184)
3.4.1 板壳结构的定义 .....	(125)	4.4.3 黑体热辐射分析完整求 解命令流 .....	(190)
3.4.2 ANSYS 常用的 板壳单元 .....	(126)	<b>4.5 相变热分析</b> .....	(190)
3.4.3 实例分析: 薄板圆孔构件 承载分析 .....	(126)	4.5.1 相变热分析概述 .....	(191)
3.5 工程实例: 龙门起重机主梁 静力分析 .....	(134)	4.5.2 实例分析: 冰块融化的 热分析 .....	(191)
3.5.1 问题描述 .....	(134)	4.5.3 完整命令流 .....	(206)
3.5.2 问题分析 .....	(135)	<b>4.6 热-结构耦合场分析</b> .....	(208)
3.5.3 求解步骤 .....	(135)	4.6.1 热-结构耦合场概述 .....	(208)
3.5.4 龙门起重机主梁静力 分析完整命令流 .....	(145)	4.6.2 实例分析: 压力容器热-结构 耦合分析 .....	(209)
本章小结 .....	(147)	4.6.3 压力容器热-结构耦合 分析完整命令流 .....	(217)
思考题 .....	(147)	<b>4.7 工程实例: 金刚石膜的残余热 应力计算</b> .....	(221)
常见疑难问题解析 .....	(148)	4.7.1 问题描述和分析 .....	(221)
<b>第4章 热学分析</b> .....	(150)		
4.1 热学分析简介 .....	(150)		
4.1.1 基本传热方式 .....	(150)		

4.7.2 求解步骤.....	(222)	思考题.....	(299)
4.7.3 金刚石膜的残余热应力 完整命令流.....	(233)	常见疑难问题解析 .....	(300)
本章小结 .....	(235)		
思考题 .....	(235)		
常见疑难问题解析 .....	(236)		
第 5 章 动力学分析 .....	(237)	第 6 章 非线性分析 .....	(301)
5.1 动力学分析简介 .....	(237)	6.1 非线性分析概论.....	(301)
5.2 模态分析.....	(238)	6.1.1 非线性行为的原因.....	(302)
5.2.1 概述 .....	(238)	6.1.2 非线性分析的特殊性.....	(303)
5.2.2 实例分析一：桁架桥模态 分析 .....	(238)	6.2 非线性分析的基本步骤 .....	(304)
5.2.3 桁架桥模态分析完整命 令流 .....	(247)	6.2.1 前处理 .....	(304)
5.2.4 实例分析二：锚固式储 液罐的模态分析 .....	(250)	6.2.2 加载求解 .....	(305)
5.2.5 锚固式储液罐的模态分析 完整命令流 .....	(257)	6.2.3 后处理 .....	(306)
5.3 谐响应分析.....	(258)	6.3 几何非线性分析.....	(309)
5.3.1 概述 .....	(259)	6.3.1 概述 .....	(309)
5.3.2 实例分析：弹簧质量系统 谐响应分析 .....	(259)	6.3.2 实例分析：悬臂梁屈曲 分析.....	(312)
5.3.3 弹簧质量系统谐响应分析 完整命令流 .....	(264)	6.3.3 实例分析：二力杆件的大 变形分析 .....	(319)
5.4 瞬态动力学分析 .....	(265)	6.4 材料非线性分析.....	(327)
5.4.1 概述 .....	(265)	6.4.1 材料非线性概述.....	(328)
5.4.2 实例分析：预应力 T 梁 瞬态分析.....	(265)	6.4.2 实例分析：均质圆棒基于 双线性本构模型下的应 力-应变响应.....	(329)
5.4.3 预应力 T 梁瞬态分析 完整命令流 .....	(273)	6.4.3 实例分析：基于 Chaboche 循环本构模型下的应力 响应 .....	(336)
5.5 谱分析.....	(275)	6.5 状态非线性分析（接触分析）... (347)	
5.5.1 概述 .....	(275)	6.5.1 接触分析概述 .....	(347)
5.5.2 实例分析：独塔两跨斜 拉桥谱分析 .....	(276)	6.5.2 实例分析：钢球/PMMA 平面试样的径向微动接 触分析 .....	(349)
5.5.3 独塔两跨斜拉桥谱分析完 整命令流 .....	(294)	6.5.3 实例分析：微动垫作用下 的循环弯曲接触分析.....	(371)
本章小结 .....	(299)	本章小结 .....	(386)
		思考题.....	(386)
		常见疑难问题解析 .....	(386)
		第 7 章 疲劳断裂问题分析 .....	(388)
		7.1 疲劳断裂概述 .....	(388)

7.1.1 应力强度因子定义 .....	(389)	8.2.1 生成分析文件 .....	(429)
7.1.2 J 积分定义 .....	(389)	8.2.2 建立优化过程中的参数 ..	(432)
7.1.3 能量释放率定义 .....	(389)	8.2.3 进入 OPT, 指定分析	
7.2 断裂疲劳问题分析的基本步骤 ..	(390)	文件 (OPT) .....	(433)
7.2.1 建立断裂模型 .....	(390)	8.2.4 声明优化变量 .....	(433)
7.2.2 施加有限元边界条件 .....	(392)	8.2.5 选择优化工具或优化	
7.2.3 进行弹塑性分析 .....	(392)	方法 .....	(434)
7.2.4 计算断裂参数 .....	(392)	8.2.6 指定优化循环控制方式 ..	(435)
7.3 工程实例: 线弹性断裂分析 .....	(397)	8.2.7 进行优化分析 .....	(436)
7.3.1 问题描述 .....	(397)	8.2.8 查看设计序列结果 .....	(437)
7.3.2 问题分析 .....	(397)	8.3 工程实例: 矩形截面梁的结构	
7.3.3 求解步骤 .....	(398)	优化 .....	(438)
7.3.4 CT 试样断裂应力强度因		8.3.1 问题描述 .....	(438)
子计算分析完整命令流 ..	(405)	8.3.2 问题分析 .....	(438)
7.4 工程实例: 弹塑性 J 积分计算 ..	(407)	8.3.3 求解步骤 .....	(439)
7.4.1 问题描述 .....	(408)	8.3.4 矩形截面梁结构优化完	
7.4.2 问题分析 .....	(408)	整命令流 .....	(450)
7.4.3 求解步骤 .....	(408)	8.4 工程实例: 汽车起重机吊臂	
7.4.4 中心裂纹板断裂 J 积分计算		结构优化 .....	(451)
分析完整命令流 .....	(421)	8.4.1 问题描述 .....	(452)
本章小结 .....	(425)	8.4.2 问题分析 .....	(452)
思考题 .....	(425)	8.4.3 求解步骤 .....	(452)
常见疑难问题解析 .....	(425)	8.4.4 汽车起重机吊臂结构优化	
第 8 章 优化设计 .....	(427)	完整命令流 .....	(465)
8.1 优化设计概述 .....	(427)	本章小结 .....	(468)
8.1.1 什么是优化设计 .....	(427)	思考题 .....	(469)
8.1.2 基本概念 .....	(427)	常见疑难问题解析 .....	(469)
8.2 优化设计分析基本步骤 .....	(429)	参考文献 .....	(470)



# 第 1 章 ANSYS13.0 概述



## 知识点

- 有限元方法简介
- ANSYS 产品简介
- ANSYS13.0 的基本操作
- ANSYS13.0 典型分析过程

## 1.1 有限元方法简介

在实际工程技术领域中,有限元方法是一种比较新颖有效的求解各种力学和场问题的数值计算方法。该方法起源于 20 世纪早期。在 20 世纪 50 年代,使用有限元方法对航空工程中飞机结构进行建模,使有限元方法得到极大的发展。由于有限元方法具有准确和简便的优点,已经成为目前应用最为广泛的一种数值模拟计算方法。

### 1.1.1 有限元方法的基本思想

有限元方法的基本思想是把连续系统分割成有限个单元,各单元由设置的有限个节点连接,由单元和节点组成的系统来代替原来的连续系统。同时,在节点上引进场函数来代替实际作用于系统上的载荷或边界条件,并在每个单元中假设一个近似的插值函数来表示单元场函数的分布规律,再建立求解节点未知量的有限元方程,把所有单元的有限元方程集合起来,引入边界条件,构成一组代数方程组,求解得到有限个节点处的变量。

### 1.1.2 有限元方法特点

有限元方法的特点主要有三点。

#### 1. 容易理解,便于学习

有限元方法之所以会得到广泛的应用,最大的原因是其概念清晰,便于掌握。对于理论

基础较弱的人，可以通过直观的物理意义来学习；对于基础扎实的人，可以加入自己对力学及数学方面的延伸。

## 2. 应用广泛

有限元方法在理论和应用上不断地发展，可以求解很多实际工程中遇到的复杂问题。

## 3. 与计算机的联系密切

- (1) 有限元方法采用矩阵形式表达，便于编写计算机程序。
- (2) 利用计算机求解问题。

### 1.1.3 有限元分析基本步骤

有限元分析基本步骤如下：

- (1) 连续系统的离散化，即将某个工程结构离散为各种单元组成的计算模型；
- (2) 选择单元模式，有位移法、力法和混合法，假设得到代表单元解的近似连续函数；
- (3) 分析单元的力学性质，找出节点力和节点位移之间的关系；
- (4) 利用几何方程和物理方程建立力与位移的方程式，得到单元刚度矩阵；
- (5) 计算等效节点力；
- (6) 利用结构里的平衡条件和边界条件把各个单元按原来的结构重新连接起来，形成整体的有限元方程；
- (7) 求解有限元方程，解得节点位移；
- (8) 进而利用各种力学关系得到其他信息。

## 1.2 ANSYS 产品简介

ANSYS 软件是融合结构、流体、电场、磁场和声场分析于一体的大型通用有限元分析软件，广泛应用于土木工程、地质矿产、水利、汽车工程、机械制造、航空航天、核工程等一般工业及科学研究。ANSYS 软件主要包括前处理模块、分析计算模块和后处理模块 3 部分。ANSYS 提供了 100 种以上的单元类型，用来模拟工程中各种结构和材料。

### 1.2.1 ANSYS 系列产品发展过程

ANSYS 公司成立于 1970 年，总部在美国宾夕法尼亚州的匹兹堡，目前是世界上 CAE 行业最大的公司。创始人 Jone Swanson 博士是匹兹堡大学力学系教授、有限元界权威。作为一个大型的 CAE 分析软件，ANSYS 自 20 世纪 70 年代诞生以来，随着计算机和有限元理论的发展，在各个领域得到了高度的评价和广泛的应用。在 40 多年的发展过程中，ANSYS 不断改进和提高，其功能不断增强，目前最新的版本已经发展到 13.0 版本。

ANSYS 软件是第一个通过 ISO9001 质量认证的大型有限元分析设计软件，是美国机械工程师协会、美国核安全局及近 20 种专业技术协会认证的标准分析软件。在国内，ANSYS 软件是第一个通过中国压力容器标准化技术委员会认证并在国务院十七个部委推广使用的有限元软件。

ANSYS 最初的版本只提供了热分析和线性分析功能，是一个批处理程序，而且只能在大型计算机上使用。20 世纪 70 年代初，随着非线性、子结构，以及更多单元类型的加入，ANSYS 程序发生了很大的变化，新技术的融入进一步满足了用户的需求。20 世纪 70 年代末，该软件最显著的变化是交互方式的加入，它使得模型生成和结果评价简化。

## 1.2.2 ANSYS13.0 技术特点

ANSYS 软件作为应用广泛的有限元分析软件，与其他有限元软件相比，具有以下特点：

(1) ANSYS 使用统一的数据库来储存数据及求解结果，实现前后处理、分析求解及多场分析的数据统一；

(2) 具有强大的非线性分析功能，可以分析几何非线性、材料非线性，以及状态非线性；

(3) 具有强大且快速的求解器，不但可以满足不同的工程需求，而且还可以快速求解问题；

(4) 可以自动生成有限元网格，简便、易操作；

(5) 具有强大的建模功能，不仅具有二维的建模能力，也具备强大的三维建模功能；

(6) 可以实现多场及多场耦合功能；

(7) 良好的优化功能；

(8) 提供和多种 CAD 软件及有限元软件的接口程序；

(9) 具有良好的用户开发环境；

(10) 兼容所有硬件平台上的全部数据文件，如微型机、工作站、巨型机等。

## 1.2.3 ANSYS13.0 功能创新

相比原来的 ANSYS 系列软件，ANSYS13.0 的使用功能存在着以下几个重要的创新点。

### 1. ANSYS Workbench2.0

ANSYS Workbench 作为一个框架，整合现有的应用，将仿真过程结合在一起，这一点在 ANSYS Workbench2.0 中没有改变。但在工程页引入了工程图解的概念。通过该项功能，一个复杂的包含多场分析的物理问题，通过系统间的连接实现相关性。

此外，ANSYS Workbench2.0 平台还可以作为一个应用开发框架，提供项目全脚本、报告、用户界面 (UI) 工具包和标准的数据接口，该功能将随后发布。在 ANSYS13.0 版本中，工程数据和 DesignXplorer 将不再是独立的应用程序，它们通过 UI 工具箱被重新设计整合在 ANSYS Workbench 工程页下。尽管工程页做了较大调整，但 Workbench 的核心应用程序及操作界面并无大的改变。在这个创新的框架下，工程师可以完成一个完整的仿真分析，包括 CAD 集成、几何修改和网格划分。工程页的概念图解帮助指导用户完成复杂的分析，说明

和明确数据关系，捕捉自动化的过程。

## 2. 几何和网格划分

ANSYS 在其深厚的知识和经验的基础上，融合了丰富的几何和网格划分技术，整合后的几何和网格划分解决方案，在不同的分析应用中可以共享几何和网格信息。ANSYS13.0 版本对几何接口进行了增强，通过几何接口，用户可以从 CAD 系统中输入更多的信息，包括新的数据类型，如用于模拟梁的线体，附加属性诸如颜色、坐标系及在 CAD 系统中改进的命名选择等。前处理大模型时，ANSYS13.0 版本支持 64 位操作系统，可以对几何进行智能、选择更新。

另外，ANSYS13.0 版本增强了 Workbench 环境下创建几何的功能，提供了更多的自动化功能和更强的适应性，增加了合并、连接和映射等功能用于曲面建模。新增工具可以自动探测处理常见问题，如小边、碎面、孔洞、裂痕，以及尖角面。新版本对几何模型的修改和处理速度更快。

ANSYS13.0 版本提供的自动网格划分解决方案在流体动力学中取得了很好的结果。应用 GAMBIT 和 TGrid 的网格附加功能，ANSYS13.0 版本可以在用户最少的输入下自动生成 CFD 合适的四面体网格。另外，它融合了高级尺寸函数（与 GAMBIT 相似）、棱柱及四面体网格（来自 TGRID）和其他网格划分技术，改进了网格平滑度、网格质量、划分速度、曲率近似功能捕捉、边界分层捕捉等功能。尽管许多功能是出于流体动力学的应用而改进的，但是它们仍然可以用于其他仿真分析应用。例如，结构分析的用户可以应用这些功能，得到自动化和高质量的网格。新增多区域网格划分方法使用户在不进行几何分割的情况下，可以将复杂的几何模型划分为纯六面体网格。

## 3. 多物理场

ANSYS13.0 版本扩展了多场求解功能。新增功能及增强功能可以处理直接耦合和顺序耦合的多物理场问题，ANSYS Workbench 下的多场仿真速度比以前更快。ANSYS 求解器技术的整合在 13.0 版本往前迈出了很大一步，它将求解器技术整合在一个统一的仿真环境中，为多场求解提供了更有效的工作流程。ANSYS13.0 版本扩展分布式稀疏求解器功能，支持共享分布式计算环境下的非对称和复杂矩阵。这种新的求解技术极大地缩短了某些直接耦合解决方案的执行时间，如包含 Pelbier 和 Seebeck 效应的耦合场分析，以及热电耦合分析等。此外，ANSYS13.0 版本可以应用直接耦合单元模拟多孔介质的渗流。

ANSYS Workbench 框架支持直接耦合场分析，相关的直接耦合场单元（Solid226 和 Solid227）在 ANSYS13.0 版本中支持热电耦合。此外，还有一个热电耦合分析系统支持温度相关材料的焦耳传热分析和高级热电效应，如 Peltier 和 Seebeck 效应。该新技术的应用领域包括集成电路、电子轨道、排线和热电制冷装置的焦耳热分析。

流固耦合功能中提出了一种新的 Immersed Solid FSI 算法。这是一种基于网格重叠的技术，流体和固体区域各自拥有一套网格，该算法可以帮助工程师模拟流场中运动刚体与流体之间的相互作用。

ANSYS13.0 流固耦合的另外一个新功能就是可以通过求解非线性雷诺压膜方程来解决



FSI 涉及薄液膜的非线性瞬态应用。13.0 版本提供了另外一个 FSI 功能，该功能采用 ANSYS Fluent 软件作为 CFD 求解器来进行单向流固耦合计算，基于 ANSYS CFX-Post，可以使表面温度和表面力在 ANSYS Fluent 和 ANSYS Mechanical 产品之间进行单向载荷传递。

#### 4. 结构力学

ANSYS13.0 版本在结构应用中的驱动工程设计过程功能得到了很大的改进。许多新增功能及工具整合到 ANSYS Workbench 平台中，以缩短整体求解时间。另外，在单元、材料、接触、求解性能、线性动力学、刚体动力学及柔体动力学上也集中进行了改进。

ANSYS13.0 版本中最引人注目的新单元是用于超弹性或成型应用中模拟复杂几何的 4 节点四面体单元。它缩短了从几何到求解的分析时间，同时保证了求解的精确度。材料方面，ANSYS13.0 版本在原有众多选择的基础上引入了几个新材料，如 Gurson 材料，可用于模拟聚合体及聚合体复合材料等。

装配体分析在仿真中越来越重要，ANSYS13.0 版本增强了高级接触属性，开发了包含许多附加接触模拟特征，包括新增接触算法、自动去除过约束、接触对修整等功能，在求解接触问题时得到了极大的改进，缩短了求解时间，加快了求解速度。

ANSYS13.0 版本改善了求解器性能，新增一个新的模态求解器，称为 SNODE，用于求解大模型（超过 100 万自由度）的大数量振型（几百阶振型）。并行求解器 DANSYS 的功能也进行了改进，支持低频电磁分析、高频电磁分析、PSTRESS、PSOLVE 及循环对称分析，可以有效地解决电磁问题、转子动力学问题及循环对称和应力强化问题，节约求解时间。ANSYS13.0 版本的 ANSYS Structural, Mechanical 及 Multiphysics 在刚体动力学及柔体动力学功能上做了改进，可以快速处理机构问题。另外，对数据及过程的众多改进增加了 ANSYS 刚体动力学仿真的易用性。

#### 5. 流体动力学

ANSYS13.0 将流体产品完全整合进 ANSYS Workbench 环境，以便在该环境下进行仿真工作流程的管理。用户可以采用 ANSYS CFX 或 ANSYS Fluent 软件来创建、连接、重复使用系统来完成自动参数化分析，然后进行多物理场无缝管理仿真。

ANSYS Fluent 通过显式松弛增加了密度基隐式求解器的稳健性，采用递推映射方法选项来提高稳定性（耦合压力基求解器），极大地增强了求解器性能。另外，程序的易用性在很多方面得到了提高。ANSYS Fluent 采用单视图用户图形界面，以便和 Workbench 中的其他分析应用保持一致，同时改进了 TUI 日志的鲁棒性，扩展了 Case Check 的推荐功能，在用户界面发展史上又前进了一步。ANSYS CFX 软件界面风格上的主要改进在于增加了图形用户界面（GUI）。ANSYS13.0 版本的一个新功能允许用户定制界面外观，包括创建附加输入面板。用户定制面板通过 GUI 布局和必要的输入进行用户控制，将常用操作及基本过程封装在一起。

#### 6. 显式动力学

ANSYS 在 ANSYS13.0 版本显式动力学领域倾注了大量的精力，包括附加新产品，使该技术对于无使用经验者也易于使用。另外，增强 ANSYS LS-DYNA 和 ANSYS AUTODYN

产品功能，为用户提供更大的便利。ANSYS13.0 版本新增 ANSYS Explicit STR 软件，它基于 ANSYS AutoDYN 产品的拉普拉斯算子部分，是 ANSYS Workbench 界面第一个本地显式软件。该技术可用于满足固体、流体、气体及它们之间相互作用的非线性动力学仿真。对已有 Workbench 环境使用经验的用户，该软件具有更好的适用性。

## 1.2.4 ANSYS13.0 使用环境

ANSYS 程序是一个功能强大的设计分析及优化的软件包。该软件可以运行于各类计算机及操作系统中，数据文件在所有的产品系列和工作平台上均是兼容的。

ANSYS 可以允许在同一种模型上进行各式各样的耦合计算，如流/固耦合、热/结构耦合、磁/结构耦合及电/磁/流/热耦合，在 PC 上生成的模型同样可以在巨型机上运行，这样就保证了所有 ANSYS 用户的多领域多变工程问题的求解。

ANSYS 可以利用数据接口与许多先进的 CAD 软件（如 Pro/Engineer、NASTRAN、Alogor、I-DEAS 及 AutoCAD 等）共享数据，可精确地将在 CAD 系统下生成的几何数据传入 ANSYS，并通过必要的修补准确地在该模型上划分网格并求解，这样可以节省用户创建模型过程中所花费的大量时间，使工作效率得到了极大的提高。

## 1.2.5 ANSYS13.0 软件功能

ANSYS13.0 的主要软件功能为结构分析、热分析、电磁分析、流体分析（CFD），以及耦合场分析。

### 1. 结构分析

结构分析用于确定结构的变形、应变、应力及反力，以及研究结构的强度、刚度和稳定性。ANSYS13.0 结构分析可以分为以下几类。

- （1）静力分析：用于静态载荷。可以考虑结构的线性及非线性行为，如大变形、大应变、应力刚化、接触、塑性、超弹及蠕变等。
- （2）模态分析：计算线性结构的自振频率及振形。
- （3）谱分析：模态分析的扩展，用于计算由于随机振动引起的结构应力和应变。
- （4）谐响应分析：确定线性结构对随时间按正弦曲线变化的载荷的响应。
- （5）瞬态动力学分析：确定结构对随时间任意变化的载荷的响应。可以考虑与静力分析相同的结构非线性行为。
- （6）特征屈曲分析：用于计算线性屈曲载荷并确定屈曲模态形状（结合瞬态动力学分析可以实现非线性屈曲分析）。
- （7）专项分析：断裂分析、复合材料分析、疲劳分析等。
- （8）显式动力学分析（ANSYS LS-DYNA）：用于模拟非常大的变形，惯性力占支配地位，并考虑所有的非线性行为。它的显式方程求解冲击、碰撞、快速成型等问题，是目前求解这类问题最有效的方法。

## 2. 热分析

ANSYS 热分析计算物体的稳态或瞬态温度分布, 以及热量的获取或损失、热梯度、热通量等。ANSYS13.0 热分析具有以下功能。

- (1) 稳态热分析: 用于研究稳态的热载荷对系统或部件的影响。
- (2) 瞬态热分析: 用于研究一个随时间变化的温度场及其他热参数。
- (3) 三种热传递方式 (热传导、热对流和热辐射): 用于分析系统各部件间的温度传递。
- (4) 相变分析: 用于分析熔化及凝固, 以及内热源 (如电阻发热等)。
- (5) 热应力分析: 热分析之后往往进行结构分析, 计算由于热膨胀或收缩不均匀引起的应力。

## 3. 电磁分析

磁场分析用于计算磁场, 磁场分析中考虑的物理量是磁通量密度、磁场密度、磁力、磁力矩、阻抗、电感、涡流、能耗及磁通量泄漏等。磁场可由电流、永磁体、外加磁场等产生。磁场分析的类型可以分为以下几种。

- (1) 静磁场分析: 计算直流电 (DC) 或永磁体产生的磁场。
- (2) 交变磁场分析: 计算由于交流电 (AC) 产生的磁场。
- (3) 瞬态磁场分析: 计算随时间随机变化的电流或外界引起的磁场。
- (4) 高频电磁场分析: 用于微波及 RF 无源组件, 波导、雷达系统、同轴连接器等分析。

电场分析用于计算电阻或电容系统的电场, 典型的物理量有电流密度、电荷密度、电场及电阻热等。

## 4. 流体分析 (CFD)

流体分析用于确定流体的流动及热行为。流体分析可以分以下几类。

- (1) CFD-ANSYS/FLOTRAN: 提供强大的计算流体动力学分析功能, 包括不可压缩或可压缩流体、层流及湍流, 以及多组分流等。
- (2) 声学分析: 考虑流体介质与周围固体的相互作用, 进行声波传递或水下结构的动力学分析等。
- (3) 容器内流体分析: 考虑容器内的非流动流体的影响, 可以确定由于晃动引起的静水压力。
- (4) 流体动力学耦合分析: 在考虑流体约束质量的动力响应基础上, 在结构动力学分析中使用流体耦合单元。

## 5. 耦合场分析

耦合场分析考虑两个或多个物理场之间的相互作用。当两个物理场之间相互影响, 单独求解一个物理场是不可能得到正确结果的, 因此需要一个能够将两个物理场组合到一起求解的分析软件。ANSYS13.0 中可以实现的耦合场分析的典型情况有热-结构、磁-热、流体-热、热-电、流体-结构、电-磁-热等。

## 1.2.6 ANSYS13.0 文件系统

ANSYS 软件广泛应用文件来存储和恢复数据，特别是在求解分析时。这些文件被命名为 `jobname.ext`，其中 `jobname` 是默认的作业名，`ext` 是由 ANSYS 定义的唯一的由 2~4 字符组成的扩展名，表明文件的内容。作业名是进入 ANSYS 后用户指定的文件名，如果没有给文件起名，则默认的作业名为 `file`。ANSYS 不支持中文的文件名。

在 ANSYS 运行结束前某一时刻被删除的文件称为临时文件，参见表 1-1。在 ANSYS 运行结束后仍然保留的文件称为永久性文件，参见表 1-2。

表 1-1 ANSYS 产生的临时文件

文 件 名	类 型	内 容
<code>jobname.ano</code>	文本	图形注释命令
<code>jobname.bat</code>	文本	从批处理输入文件中复制的输入数据
<code>jobname.don</code>	文本	嵌套层 $n$ 的循环命令
<code>jobname.erot</code>	二进制	旋转单元矩阵文件
<code>jobname.page</code>	二进制	虚拟内存页文件

表 1-2 ANSYS 产生的永久性文件

文 件 名	类 型	内 容
<code>jobname.db</code>	二进制	数据库文件
<code>jobname.elem</code>	文本	单元定义文件
<code>jobname.emat</code>	二进制	单元矩阵文件
<code>jobname.err</code>	文本	出错及警告文件
<code>jobname.esav</code>	二进制	单元数据存储文件
<code>jobname.log</code>	文本	日志文件
<code>jobname.out</code>	文本	输出文件
<code>jobname.rfl</code>	二进制	FOLOTTRAN 分析的结果文件
<code>jobname.rmg</code>	二进制	磁场分析的结果文件
<code>jobname.rst</code>	二进制	结构和耦合场分析的结果文件
<code>jobname.rsh</code>	二进制	温度场分析的结果文件
<code>jobname.snn</code>	文本	载荷步文件
<code>jobname.stat</code>	文本	批处理运行状态文件

ANSYS 保存数据的文件使用了许多种不同的存储格式，其中有的采用文本格式（ASCII 码），有的采用二进制格式。对于文本格式的文件来说，可以使用文本编辑器对其中的文本进行查看和编辑。

## 1.3 ANSYS13.0 的基本操作

在学习 ANSYS13.0 软件之前,首先了解基本的操作,熟悉常用的启动方式、界面和退出选项。

### 1.3.1 ANSYS13.0 启动

启动 ANSYS13.0 软件,依次单击:开始→所有程序→ANSYS13.0→Mechanical APDL Product Launcher,其启动界面如图 1-1 所示。启动后会出现“ANSYS Mechanical APDL Product Launcher”窗口,如图 1-2 所示。

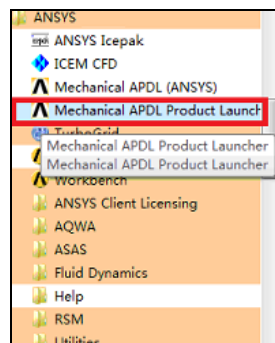


图 1-1 启动界面

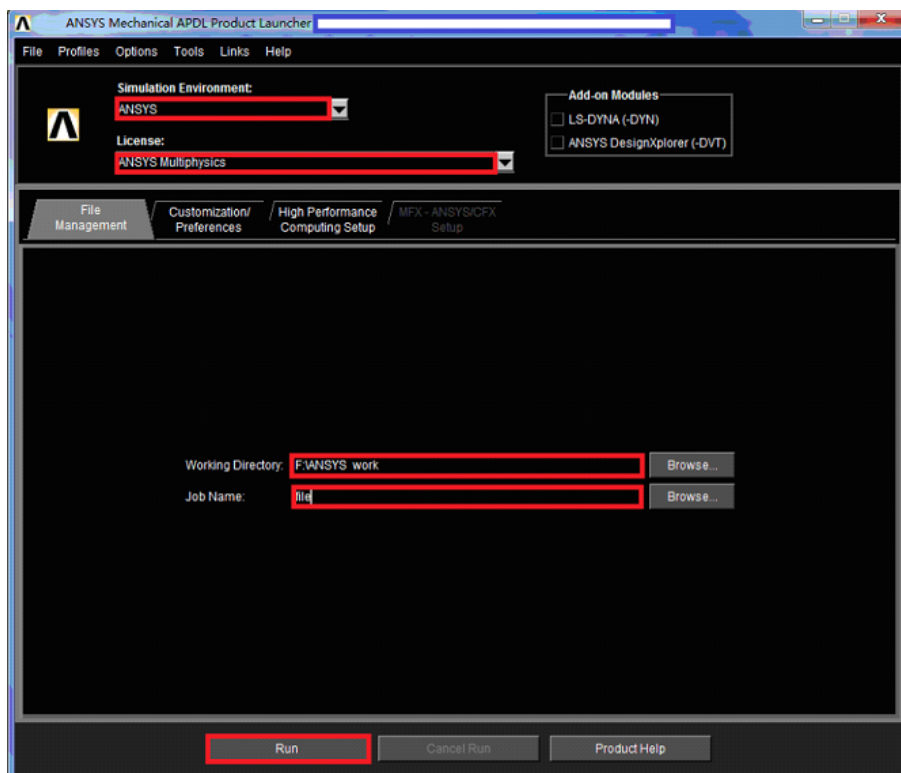


图 1-2 “ANSYS Mechanical APDL Product Launcher”窗口

对于第一次使用 ANSYS 软件的用户,则要对一些参数进行修改和设定。

#### 1. 选择合适的 ANSYS 产品

用户可以在“Simulation Environment”下拉列表中选择所需要的模拟环境,一般选择“ANSYS”选项;在“License”下拉列表中选择“ANSYS Multiphysics”选项。

## 2. 选择工作目录，设置文件名

在“Working Directory”输入栏中输入工作目录，也可以通过单击“Browse”按钮进行选择，ANSYS 软件所生成的文件都将存储在此目录下；在“Job Name”输入栏中输入工作文件名，也可以通过单击“Browse”按钮选择工作文件名，ANSYS 默认的工作文件名为 file。

## 3. 设置 ANSYS 工作空间和数据库大小

在“Customization/Preferences”选项卡的“Memory”下拉列表中设置 ANSYS 工作空间和数据库大小。在“Graphics Device Name”下拉列表中设置图形设备名称。不同的选项在模型视角转换和绘制结果云图时会产生不同的效果。ANSYS 软件提供了 3 种不同的图形设备驱动选项，分别为 Win32、Win32c 和 3D 选项。Win32 选项适用于大多数的图形显示，在后处理中可以提供 9 种颜色的等值线；Win32c 选项则能提供 128 种颜色；3D 选项对三维图形的显示有很好的效果，如果计算机配置了 3D 显卡，则使用 3D 选项。

## 4. 运行 ANSYS13.0

以上参数设定完成，就可以单击“Run”按钮来运行 ANSYS13.0 软件了。

# 1.3.2 ANSYS13.0 用户界面

在启动 ANSYS13.0 并设定好参数之后，就会进入 ANSYS13.0 的图形用户界面(Graphical User Interface, GUI)，如图 1-3 所示。



图 1-3 图形用户界面 (GUI) 窗口

图形用户界面（GUI）窗口具体包括以下几个部分。

### 1. 应用菜单

应用菜单包含文件管理（File）、选择（Select）、数据列表（List）、图形显示（Plot）、显示控制（PlotCtrls）、工作平面（WorkPlane）、参数设置（Parameters）、宏命令（Macro）、菜单控制（MenuCtrls）和帮助（Help）等应用功能。该菜单为下拉列表式结构，可以直接完成某一功能或弹出对话框。

### 2. 快捷工具栏

对于常用的新建、打开、保存数据库、报告生成器、帮助等操作，提供了方便、快捷的按钮，可以直接单击相应的按钮完成操作。

### 3. 输入窗口

对于 ANSYS 软件的操作，除了采用常用的用户界面操作外，还可以采用命令输入。在此窗口输入 ANSYS 各种命令，并在输入命令的同时，显示有关该命令和使用参数的提示行。

### 4. 工具条

工具条包括一些常用的 ANSYS 命令和函数，是执行命令的快捷方式。用户可以根据需要对该窗口中的快捷命令进行编辑、修改、删除等操作，只要用鼠标单击相应按钮即可运行该命令。最多可以设置 100 个命令按钮。

### 5. 主菜单

主菜单基本上涵盖了 ANSYS 分析过程中的所有菜单命令，按 ANSYS 分析的顺序进行排列，包括前处理、求解器、通用后处理、时间历程后处理、优化设计等。“+”表示设有下级子菜单选项。

### 6. 图形显示窗口

图形显示窗口是 ANSYS 的主要窗口。分析模型、网格、计算结果、云图、等值线、动画等图形信息，以及求解过程中的收敛信息均显示在此窗口中。

### 7. 状态栏

状态栏显示 ANSYS 的一些当前信息，如当前求解器、材料、系统坐标系等。另外，在 GUI 操作中还有一些具体的操作提示。

在 ANSYS13.0 启动以后，会有一个隐藏的窗口，这是一个类似于 DOS 的界面窗口，如图 1-4 所示。它的主要作用是显示 ANSYS 软件对已经输入的命令或已经使用的功能的响应信息，包括用户使用命令时的出错信息和警告信息。它还有一个特殊的用途，就是可以对 ANSYS 进行特殊控制，如在计算过程中强制中断或强制退出。如果关闭这个窗口，相应的 ANSYS 也会终止运行而退出，因此在操作过程中不要随意关闭此窗口。

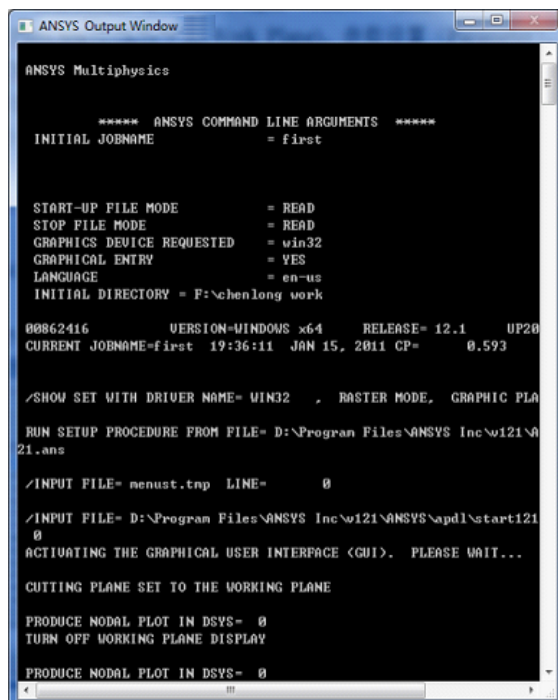


图 1-4 ANSYS13.0 的隐藏 DOS 窗口

### 1.3.3 ANSYS13.0 退出

如果需要退出 ANSYS13.0, 则应选择应用菜单 (Utility Menu) File→Exit 命令, 或直接单击右上方的 “×” 按钮, 如图 1-5 所示。

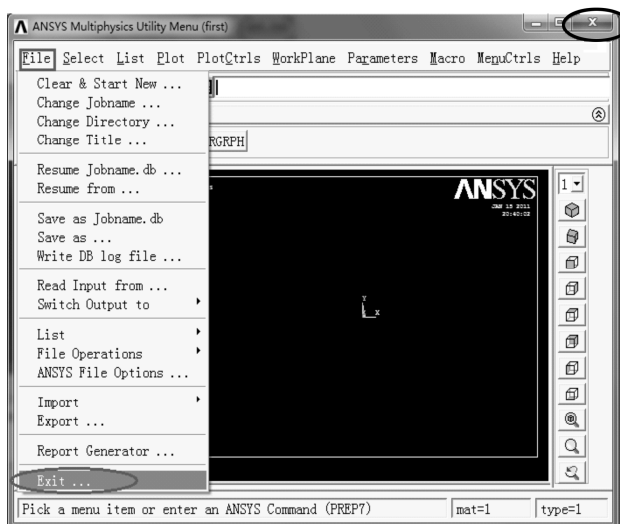


图 1-5 退出 ANSYS13.0 的主要方式示意图



进行退出操作后，会出现如图 1-6 所示的关闭 ANSYS 对话框，其中 4 个单选按钮的功能介绍如下所述。

(1) **Save Geom+Loads**: 退出 ANSYS 时保存几何模型、载荷及约束。

(2) **Save Geo+Ld+Solu**: 退出 ANSYS 时保存几何模型、载荷、约束及求解结果。

(3) **Save Everything**: 退出 ANSYS 时保存所做的修改。

(4) **Quit-No Save!**: 退出 ANSYS 时不保存所做的修改。

选择所需要的单选按钮，单击“OK”按钮退出 ANSYS13.0。

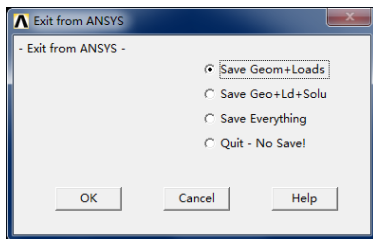


图 1-6 关闭 ANSYS 对话框

## 1.4 ANSYS13.0 典型分析过程

一个典型的 ANSYS 分析过程主要包括前处理、加载求解和后处理 3 个步骤。

### 1.4.1 前处理

- (1) 制定作业名和分析标题。
- (2) 定义单元类型。
- (3) 定义单元实常数。
- (4) 定义材料特性。
- (5) 创建几何模型。
- (6) 对实体模型进行网格划分。

### 1.4.2 加载求解

- (1) 定义分析类型和分析选项。
- (2) 施加载荷及约束。
- (3) 指定载荷步骤选项。
- (4) 求解初始化。

### 1.4.3 后处理

- (1) 从计算结果中读取数据。
- (2) 对计算结果进行各种图形化显示。
- (3) 计算结果列表显示。
- (4) 进行各种后续分析。

## 1.5 ANSYS13.0 的帮助文件

ANSYS13.0 提供了强大的在线帮助系统，包括 ANSYS 所有命令的解释和说明及 GUI 操作步骤，还包括 ANSYS 系统分析指南和在线教程等。

帮助系统可以通过以下 3 种方式启动。

(1) 通过单击应用菜单中的“Help”按钮，如图 1-7 所示。

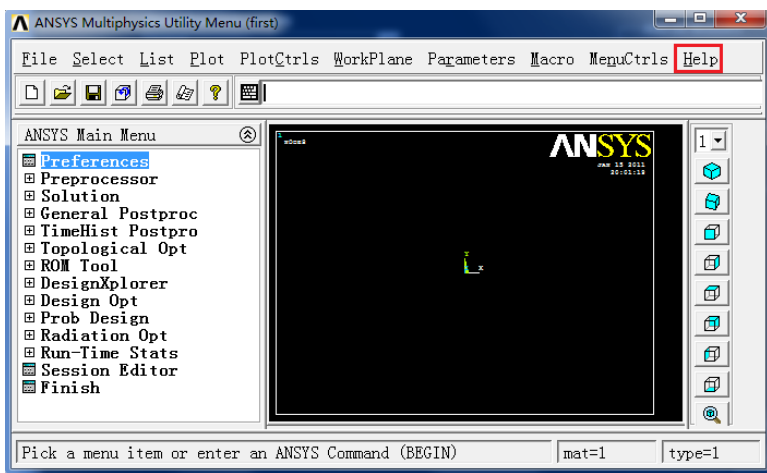


图 1-7 通过菜单启动帮助系统

(2) 依次单击：开始→所有程序→ANSYS13.0→Help，启动 ANSYS 帮助文件，如图 1-8 所示。

(3) 在任意一个对话框中单击“Help”按钮，如图 1-9 所示。

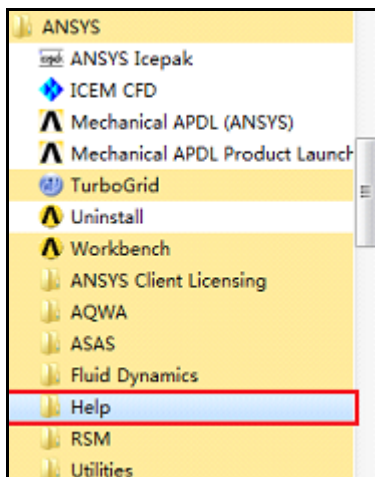


图 1-8 通过帮助程序启动帮助系统

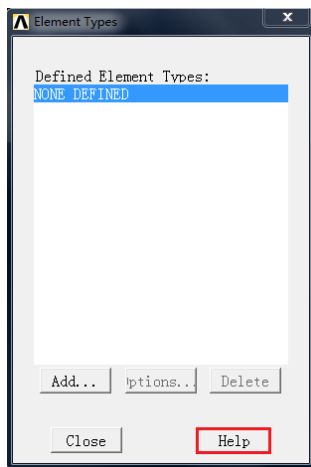


图 1-9 通过对话框启动帮助系统

进入帮助系统后,就会出现如图 1-10 所示的帮助系统首页,在“Contents”选项卡下可以找到所有帮助系统的信息,便于系统地学习;在“Search”选项卡下可以输入要查询的知识点,进行该知识点的学习。

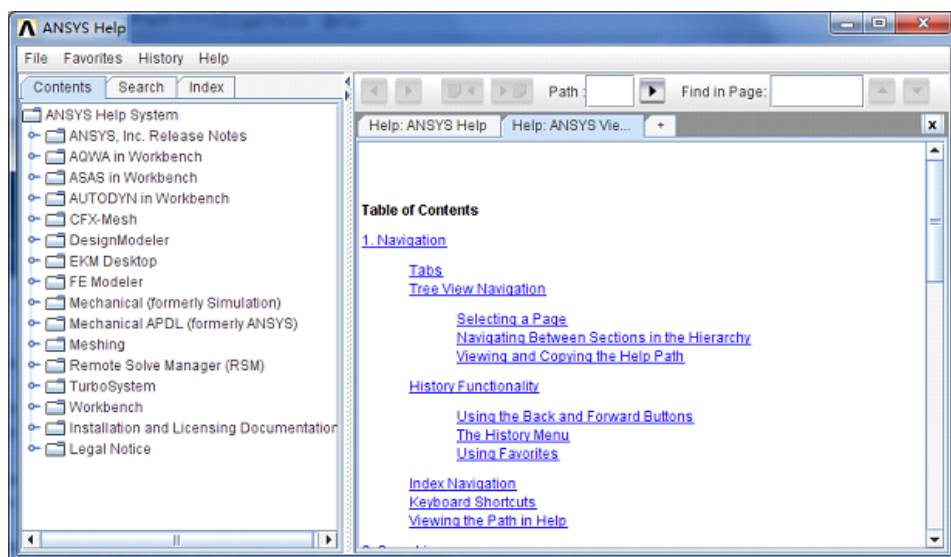


图 1-10 帮助系统首页

ANSYS13.0 提供了一系列典型的在线教程。单击应用菜单中的“Help”按钮,在下拉菜单中选择“ANSYS Tutorials”,即可启动 ANSYS13.0 的在线教程,如图 1-11 所示。

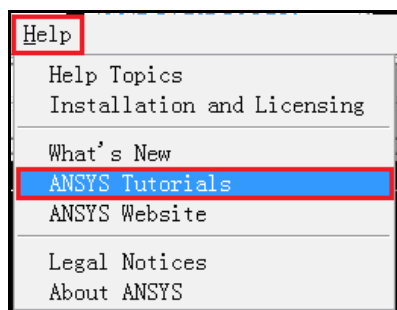


图 1-11 启动 Help 在线教程

## 本章小结

本章首先对有限元方法进行了简单介绍,向初学者介绍有限元方法的基本理念,有助于初学者在总体上把握 ANSYS13.0 的操作步骤。然后,对 ANSYS13.0 的技术特点、功能创新、使用环境、软件功能,以及文件系统进行了详细的介绍,使得读者可以进一步了解 ANSYS13.0。最后,介绍了 ANSYS13.0 的操作步骤,这是本章的精髓,在以后解决各类问题时,都需要

进行这些操作，才可以完成。

## 思考题

- (1) ANSYS13.0 的主要软件功能有哪些？
- (2) ANSYS13.0 的典型分析过程包括哪些步骤？
- (3) 启动 ANSYS13.0 的帮助文件有哪些方式？

## 常见疑难问题解析

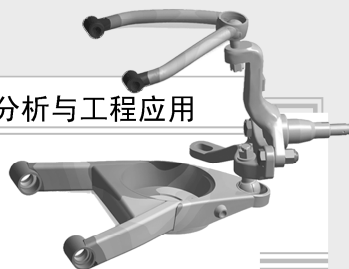
对于初学者，在阅读有限元软件操作一类的书籍时常常会对几个问题产生疑惑，结合本章的内容，对以下几个问题进行说明。

- (1) 学习 ANSYS13.0，要具备哪些方面的知识呢？

首先要对弹性力学、材料力学，以及理论力学等力学知识有比较深入的学习，其次还要具备有限元方法的一些基础理论，这样，在学习 ANSYS13.0 的过程中会比较轻松。学好 ANSYS13.0 最重要的是多练习，见到的问题越多元化，才会越有经验处理一些实际问题。

- (2) 几何模型和有限元模型有什么区别呢？

几何模型和有限元模型最基本的区别：有限元模型是已经划分了网格的，可以直接进行有限元计算，但是几何模型是不可以进行有限元计算的。



## 第 2 章 ANSYS 分析的基本步骤



### 知识点

- 建立几何模型
- 创建有限元模型
- 施加载荷
- 求解
- 后处理

### 2.1 分析问题

正确分析问题是能利用 ANSYS 软件求解具体工程结构问题的前提。这需要分析人员具备一定的专业知识，从而能够从问题的外在表现中抓住解决问题的关键因素，以及巧妙地模拟实际问题，进而达到正确分析、解决问题的事半功倍的效果。分析问题，通常可以根据结构模型的结构特点、应用环境的特点和结构材料性质等主要因素来实现。而常见的结构问题通常有对称性问题和非对称性问题、静力学问题和动力学问题、单物理场问题和耦合物理场问题，以及线弹性和非线性问题等。因此，需要确立分析对象和分析问题的类别，才能使用 ANSYS 软件进行正确的模拟分析。

### 2.2 建立几何模型

在 ANSYS 软件分析里最基本的步骤就是建立几何模型，但是建立好的几何模型不能直接进行有限元求解，要进行网格划分后才可以进行加载与求解。建立有限元模型的方式主要有两种，分别是自底向上建模方法和自顶向下建模方法。如果模型在其他 CAD 软件中已经完成，也可以导入该几何模型。

## 2.2.1 自底向上建模方法

构建实体模型的方法主要有自底向上和自顶向下两种，并且实体模型都是由关键点、线、面和体组成的，与其构建的方法无关。自底向上建模方法，主要是先建立点，再由点连成线，然后由线组合成面，最后由面组合建立体，即点是这种建模方法最基本的元素，依次向上的元素为线、面和体。

### 1. 点定义

#### 1) 关键点 (Keypoint)

利用自底向上的方法构建实体模型时，最基本的步骤是定义关键点。实体模型建立时，点是最小的单元对象，点即为机械结构中一个点的坐标，点与点连接成线也可直接组合成面及体。点的建立是按实体模型的需要而设定的，但有时会建立些辅助点以帮助其他命令的执行。生成点的命令主要有以下几种。

##### (1) 生成一个点。

命令: K

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→In Active CS

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→On Working Plane

##### (2) 在线上定义点。

命令: KL

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→On Line

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→On Line w→Ratio

##### (3) 在两个点之间生成新的点。

命令: KBETW

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→KP between KPs

##### (4) 两个关键点之间生成点。

命令: KFILL

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→Fill between KPs

##### (5) 在三点定义的圆弧的中心生成一个点。

命令: KCENTER

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→KP at Center

(6) 由一个点生成另一个点。

命令: KGEN

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Copy→Keypoints

(7) 从一个给定模式的点生成另外的有一定比例模式的点。

命令: KSCALE

此命令是针对一些特殊的操作才可以使用的命令, 因此没有确定的 GUI 操作路径。这个命令不能在目录中出现。

(8) 由镜像模式产生点。

命令: KSYMM

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Reflect→Keypoints

(9) 将一个点转到另外一个坐标系中。

命令: KTRAN

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Move→Modify→Transfer Coord→Keypoints

(10) 给未定义的点定义一个位置。

命令: SCOURCE

此命令是针对一些特殊的操作才可以使用的命令, 因此没有确定的 GUI 操作路径。这个命令不能在目录中出现。

(11) 计算并移动一个关键点到一个交点。

命令: KMOVE

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Move→Modify→Keypoint→To Intersect

(12) 在已有节点处定义一个关键点。

命令: KNODE

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→On Node

(13) 计算关键点之间的距离。

命令: KDIST

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Check Geom→KP distances

(14) 修改关键点的坐标。

命令: KMODIF

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Move→Modify→Keypoints→Set of KPs

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Move→Modify→Keypoints→Single KP

(15) 列表显示已定义的点。

命令: KLIST

GUI 操作路径:

Utility Menu→List→Keypoint→Coordinates +Attributes

Utility Menu→List→Keypoint→Coordinates only

Utility Menu→List→Keypoint→Hard Points

(16) 绘图显示已选择的点。

命令: KPLOT

GUI 操作路径:

Utility Menu→Plot→Keypoints→Keypoints

Utility Menu→Plot→Specified Entities→Keypoints

(17) 选择点。

命令: KSEL

GUI 操作路径:

Utility Menu→Select→Entities

(18) 删除未划分网格的关键点。

命令: KDELETE

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Delete→Keypoints

2) 创建硬点 (Hard Point)

硬点是一种特殊的关键点。硬点不改变模型的几何形状和拓扑结构。大多数适用于关键点的命令均可适用于硬点，但是不能用复制、移动或修改关键点的命令操作硬点。当使用硬点时不支持映射网格划分。

(1) 在已有的线上定义单个硬点。

命令: HPTCREATE

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→Hard PT on line→Hard PT by ratio

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→Hard PT on line→Hard PT by coordinates

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→Hard PT on line→Hard PT by picking

(2) 在已有面上定义单个硬点。

命令: HPTCKEATE

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→Hard PT on line→Hard PT by coordinates

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→Hard PT on line→Hard PT by picking

(3) 直接选择硬点。

命令: KSEL



GUI 操作路径:  
Utility Menu→Select→Entities

(4) 选择线上的硬点。

命令: LSEL  
GUI 操作路径:  
Utility Menu→Select→Entities

(5) 选择面上的硬点。

命令: ASEL  
GUI 操作路径:  
Utility Menu→Select→Entities

(6) 列表显示硬点信息。

命令: KLIST  
GUI 操作路径:  
Utility Menu→List→Keypoint→Hard Points

(7) 列表显示线上的硬点信息。

命令: LLIST

此命令是针对一些特殊的操作才可以使用的命令, 因此没有确定的 GUI 操作路径。没有相应的操作。

(8) 列表显示面上的硬点信息。

命令: ALIST

此命令是针对一些特殊的操作才可以使用的命令, 因此没有确定的 GUI 操作路径。没有相应的操作。

(9) 绘图显示硬点。

命令: KPLOT  
GUI 操作路径:  
Utility Menu→Plot→Keypoints→Hard Points

(10) 删除硬点。

命令: HPTDELETE  
GUI 操作路径:  
Main Menu→Preprocessor→Modeling→Delete→Hard Points

## 2. 线段定义

建立实体模型时, 线段为面或体的边界, 由点与点连接而成, 构成不同种类的线段, 如直线、曲线、BSPLIN、圆、圆弧等, 也可直接由建立的面或体而产生。线的建立与坐标系有关, 直角坐标系为直线, 圆柱坐标系为曲线。

## 1) 创建线

### (1) 在指定两点间生成线。

命令: L

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→In Active Coord

### (2) 通过两个关键点外加半径或三个关键点可以生成弧线。

命令: LARC

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Arcs→By End KPs & Rad

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Arcs→Through 3 KPs

### (3) 生成一条由若干个关键点组成的样条曲线。

命令: BSPLIN

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Splines→Spline thru KPs

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Splines→Spline thru Locs

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Splines→With Options→Spline thru KPs

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Splines→With Options→Spline thru Locs

### (4) 生成圆弧线。

命令: CIRCLE

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Arcs→By Cent & Radius

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Arcs→Full Circle

### (5) 生成通过一系列关键点的线。

命令: SPLINE

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Splines→Segmented Spline

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Splines→With Options→Segmented Spline

### (6) 生成与一条线成一定角度的直线。

命令: LANG

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→At Angle to Line

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→Normal to Line

### (7) 生成与已有两条线成一定角度的线。

命令: L2ANG

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→Angle to 2 Lines

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→Norm to 2 Lines

(8) 生成一条与原有的线共终点且相切的线。

命令: LTAN

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→Tan to 2 Lines

(9) 生成与两条线相切的线。

命令: L2TAN

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→Tan to 2 Lines

(10) 生成在一个面上两个关键点之间最短的线。

命令: LAREA

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→Overlaid on Area

(11) 通过生成一个关键点按一定路线延伸生成线。

命令: LDRAG

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Extrude→Lines→Along Lines

(12) 关键点旋转形成的弧线。

命令: LROTAT

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Extrude→Lines→About Axis

(13) 在两相交线之间生成的圆角线。

命令: LFILIT

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Line Fillet

(14) 在任何坐标系下直接生成线的命令。

命令: LSTR

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Create→Lines→Lines→Straight Line

## 2) 线的编辑

(1) 复制形成新的线。

命令: LGEN

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Copy→Lines

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Move→Modify→Lines

(2) 镜像形成新的线。

命令: LSYMM

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Reflect→Lines

(3) 将已有的线转移坐标。

命令: LTRAN

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Move→Modify→Transfer Coord→Lines

(4) 将线分割。

命令: LDIV

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Divide→Line into 2 Ln's

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Divide→Line into N Ln's

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Divide→Lines w→Options

(5) 将两条线合并。

命令: LCOMB

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Add→Lines

(6) 将线延长。

命令: LEXTND

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Extend Line

(7) 线的列表。

命令: LLIST

GUI 操作路径:

Utility Menu→List→Lines

Utility Menu→List→Picked Entities→Lines

(8) 显示线。

命令: LPIOT

GUI 操作路径:

Utility Menu→Plot→Lines

Utility Menu→Plot→Specified Entities→Lines

(9) 选择线。

命令: LSEL

GUI 操作路径:

Utility Menu→Select→Entities

(10) 删除线。

命令: LDELE

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Delete→Line and Below

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Delete→Lines Only

### 3. 面的定义

实体模型建立时，面为体的边界，体的建立由面连接而成，面的建立可由点直接相接或线段围接而成，并构成不同数目边的面。也可直接由构建体而产生面，如要进行对应网格化，则必须将实体模型构建为四边形的组合，最简单的面为3点连接成的面，以点围成面时，点必须以顺时针或逆时针输入，面的法方向是按照右手定则决定的。

#### 1) 创建面

##### (1) 通过关键点创建面。

命令：A

GUI 操作路径：

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Arbitrary→Through KPs

##### (2) 通过边界线定义面。

命令：AL

GUI 操作路径：

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Arbitrary→By Lines

##### (3) 通过线的拖动生成面。

命令：ADrag

GUI 操作路径：

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Extrude→Along Lines

##### (4) 通过轴的旋转形成面。

命令：AROTAT

GUI 操作路径：

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Extrude→About Axis

##### (5) 在两面之间形成倒角面。

命令：AFILLT

GUI 操作路径：

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Area Fillet

##### (6) 通过引导线生成光滑曲面。

命令：ASKIN

GUI 操作路径：

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Arbitrary→By Skinning

##### (7) 通过偏移已知面生成新的面。

命令：AOFFST

GUI 操作路径：

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Arbitrary→By Offset

## 2) 编辑面

### (1) 复制面。

命令: AGEN

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Copy→Areas

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Move→Modify→Areas

### (2) 镜像产生面。

命令: ARSYM

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Reflect→Areas

### (3) 将面移到另外一个坐标系。

命令: ATRAN

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Move→Modify→Transfer Coord→Areas

### (4) 复制面的一部分。

命令: ASUB

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Arbitrary→Overlaid on Area

### (5) 面的列表。

命令: ALIST

GUI 操作路径:

Utility Menu→List→Areas

Utility Menu→List→Picked Entities→Areas

### (6) 显示面。

命令: APLOT

GUI 操作路径:

Utility Menu→Plot→Areas

Utility Menu→Plot→Specified Entities→Areas

### (7) 选择面。

命令: ASEL

GUI 操作路径:

Utility Menu→Select→Entities

### (8) 删除面。

命令: ADELE

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Delete→Area and Below

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Delete→Areas Only

#### 4. 体的定义

体为对象的最高单元，最简单体的定义为点或面组合而成。由点组合时，最多由 8 点形成 6 面，8 点顺序为相应面顺时针或逆时针皆可，其所属的面、线自动产生。以面组合时，最多为 10 块面围成的封闭体。也可由原始对象（Primitive Object）建立。

生成体的命令由已知的一组点（P1~P8）定义体积（Volume），同时也产生相对应的面及线。点的输入必须依连续的顺序，以 8 个点而言，连接的原则为相对应面的方向相同，对于 4 点角锥、6 点角柱的建立都适用。

##### 1) 生成体

###### (1) 通过关键点生成体。

命令：V

GUI 操作路径：

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Arbitrary→Through KPs

###### (2) 通过边界定义体。

命令：VA

GUI 操作路径：

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Arbitrary→By Areas

###### (3) 面的拖拉生成体。

命令：VDRAG

GUI 操作路径：

Main Menu→Preprocessor→Operate→Extrude→Along Lines

###### (4) 面的旋转生成体。

命令：VROTAT

GUI 操作路径：

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Extrude→About Axis

###### (5) 将面沿其垂直正方向偏移生成体。

命令：VOFFST

GUI 操作路径：

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Extrude→Areas→Along Normal

###### (6) 在极化坐标系下对面进行拉伸缩放生成体。

命令：VEXT

GUI 操作路径：

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Extrude→Areas→By XYZ Offset

##### 2) 编辑体

###### (1) 复制产生新的体。

命令：VGEN

GUI 操作路径：

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Copy→Volumes

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Move→Modify→Volumes

(2) 镜像产生新的体。

命令: VSYMM

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Reflect→Volumes

(3) 将体转化到另外一种坐标系中。

命令: VTRAN

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Move→Modify→Transfer Coord→Volumes

(4) 体的列表。

命令: VLIST

GUI 操作路径:

Utility Menu→List→Picked Entities→Volumes

Utility Menu→List→Volumes

(5) 显示体。

命令: VPLOT

GUI 操作路径:

Utility Menu→Plot→Specified Entities→Volumes

Utility Menu→Plot→Volumes

(6) 选择体。

命令: VSEL

GUI 操作路径:

Utility Menu→Select→Entities

(7) 删除体。

命令: VDELE

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Delete→Volume and Below

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Delete→Volumes Only

## 2.2.2 自顶向下建模方法

自顶向下建模方法直接建立较高单元对象,其所对应的较低单元对象一起产生,对象单元的高、低顺序依次为体、面、线段及点。几何体素是在工作平面内生成的,以下就是可以生成的面体素和实体体素,如矩形、圆、环形、正多边形等面体素,以及长方体、圆柱体、多棱柱体、球体等实体体素。



### 1) 生成矩形面

- (1) 在工作平面上生成一个长方形区域。

命令: RECTNG

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Rectangle→By Dimensions

- (2) 通过角点生成一个长方形区域。

命令: BLTC4

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Rectangle→By 2 Corners

- (3) 通过中心和角点生成一个长方形区域。

命令: BLTC5

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Rectangle→By Centr & Cornr

### 2) 生成圆面或者环形面

- (1) 形成以工作平面原点为圆心的环形区域。

命令: PCIRC

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Circle→By Dimensions

- (2) 在工作平面的任意位置生成一个环形区域。

命令: CYL4

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Circle→Annulus

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Circle →Partial Annulus

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Circle →Solid Circle

- (3) 通过端点形成环形区域。

命令: CYL5

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Circle→By End Points

### 3) 生成正多边形面

- (1) 以工作平面的圆点为中心生成正多边形区域。

命令: RPOLY

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Polygon→By Circumscr Rad

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Polygon→By Inscribed Rad

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Polygon→By Side Length

- (2) 在任意位置生成正多边形区域。

命令: RPR4

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Polygon→Hexagon

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Polygon→Octagon

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Polygon→Pentagon

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Polygon→Septagon

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Polygon→Square

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Polygon→Triangle

- (3) 基于工作平面坐标对生成任意多边形区域。

命令: POLY

这个命令要在 PTXY 命令后使用。此命令是针对一些特殊的操作才可以使用的命令，因此没有确定的 GUI 操作路径。

- 4) 生成长方体

- (1) 在工作平面生成长方体。

命令: BLOCK

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Block→By Dimensions

- (2) 通过角点生成长方体。

命令: BLC4

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Block→By 2 Corners & Z

- (3) 通过中心和角点生成长方体。

命令: BLC5

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Block→By Centr,Cornr,Z

- 5) 生成圆柱体

- (1) 生成的圆柱体以原点为圆心。

命令: CYLIND

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Cylinder→By Dimensions

- (2) 在任意处生成圆柱体。

命令: CYL4

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Cylinder→Hollow Cylinder

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Cylinder→Partial Cylinder

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Cylinder→Solid Cylinder

(3) 通过端点生成圆柱体。

命令: CYL5

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Cylinder→By End Pts & Z

6) 生成多棱柱

(1) 生成圆心在原点的正棱柱。

命令: RPRISM

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Prism→By Circumscr Rad or→By Inscribed Rad or→By Side Length

(2) 在任意位置生成多棱柱体。

命令: RPR4

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Prism→Hexagonal

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Prism→Octagonal

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Prism→Pentagonal

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Prism→Septagonal

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Prism→Square

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Prism→Triangular

(3) 基于工作平面坐标生成任意多棱柱体。

命令: PRISM

这个命令要在 PTXY 命令后使用。此命令是针对一些特殊的操作才可以使用的命令, 因此没有确定的 GUI 操作路径。

7) 生成球体

(1) 生成的球体以原点为圆心。

命令: SPHERE

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Sphere→By Dimensions

(2) 在任意位置生成球体。

命令: SPH4

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Sphere→Hollow Sphere

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Sphere→Solid Sphere

(3) 以直径的端点生成球体。

命令: SPH5

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Sphere→By End Points

## 8) 生成锥体

(1) 生成的锥体以原点为圆心。

命令: CONE

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Cone→By Dimensions

(2) 在任意位置生成锥体。

命令: CON4

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Cone→By Picking

## 9) 生成环体

命令: TORUS

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Torus

## 2.2.3 实体模型的布尔操作

布尔操作可对几何图元进行布尔计算, ANSYS 布尔运算包括 Intersect (交)、Add (加)、Subtract (减)、Divide (分割)、Overlap (搭接)、Partion (分块连接)、Glue (黏结), 它们不仅适用于简单的图元, 也适用于从 CAD 系统中传入的复杂几何模型。设置布尔运算的命令: BOPTN

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Setting

布尔运算设置 ( “Boolean Operation Settings” ) 对话框如图 2-1 所示。

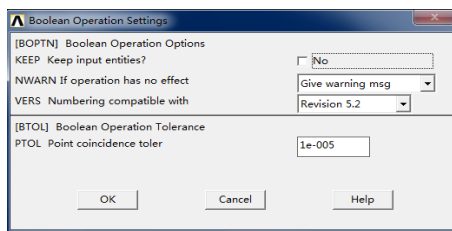


图 2-1 布尔运算设置 ( “Boolean Operation Settings” ) 对话框

布尔运算设置对话框中包括是否保留原始图元、操作无效时的响应、对布尔运算产生的图元进行编号的控制版本、布尔运算允许的偏差。对于初学者, 以上的设置基本上可以使用默认设置。

### 1. 交运算 ( Intersect )

交运算产生的结果是两个及两个以上的图元的重复区域构成新的图元。这个新的图元与原来计算的图元有相同或者低于原来图元的维数。交运算包括: 两线相交、两面相交、两体

相交、线面相交、面体相交，以及比较特殊的两两相交，有线的两两相交、面的两两相交，以及体的两两相交。下面一一介绍这些操作命令、GUI 操作路径，以及相关示意图。

(1) 两线相交：得到点或线，其示意图如图 2-2 所示。

命令：LINL

GUI 操作路径：

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Intersect→Common→Lines

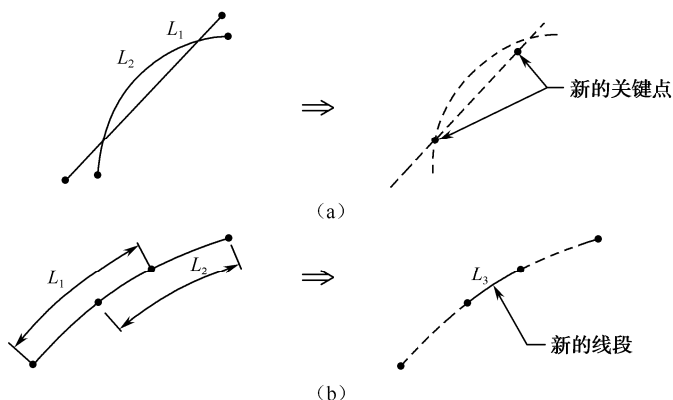


图 2-2 两线相交示意图

(2) 两面相交：得到新的面或线，其示意图如图 2-3 所示。

命令：AINA

GUI 操作路径：

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Intersect→Common→Areas

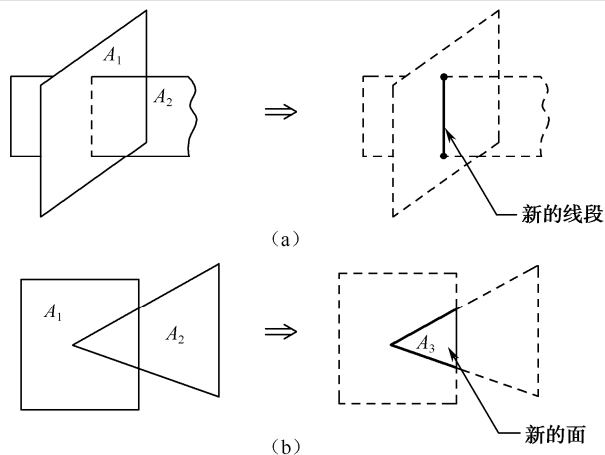


图 2-3 两面相交示意图

(3) 两体相交：得到新的面和新的体，其示意图如图 2-4 所示。

命令：VINV

GUI 操作路径：

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Intersect→Common→Volumes

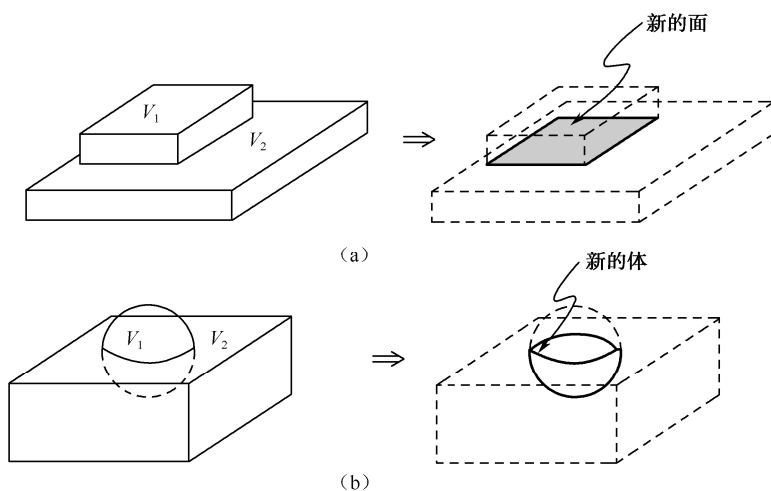


图 2-4 两体相交示意图

(4) 线面相交：在同一平面内产生新的线，不在同一平面产生新的点，其示意图如图 2-5 所示。

命令：LINA

GUI 操作路径：

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Intersect→Line with Area

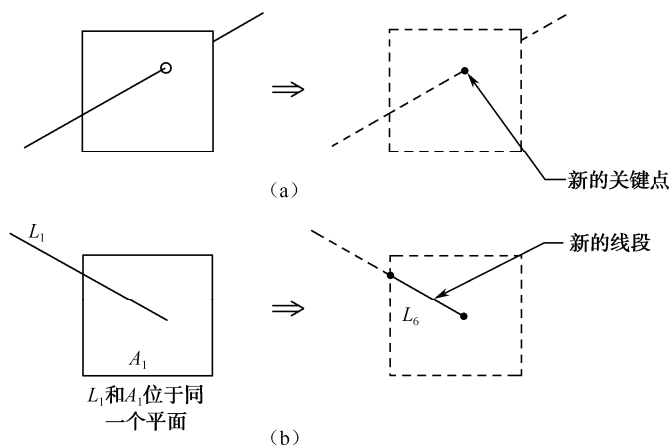


图 2-5 线面相交示意图

(5) 面体相交：得到新的体或新的面，其示意图如图 2-6 所示。

命令：AINV

GUI 操作路径：

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Intersect→Area with Volume

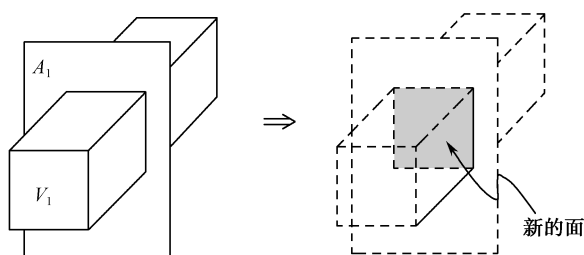


图 2-6 面体相交示意图

(6) 线体相交：生成新的线，其示意图如图 2-7 所示。

命令：LINV

GUI 操作路径：

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Intersect→Line with Volume

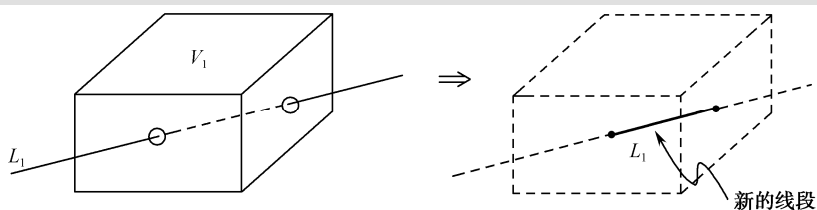


图 2-7 线体相交示意图

(7) 线的两两相交：生成新的点或线，其示意图如图 2-8 所示。

命令：LINP

GUI 操作路径：

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Intersect→Pairwise→Lines

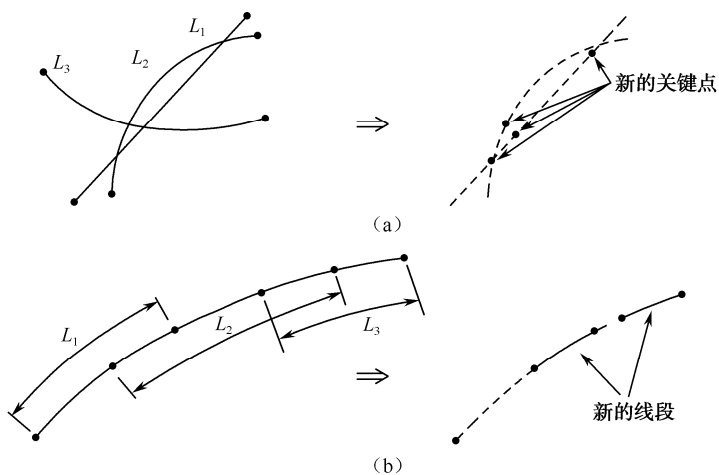


图 2-8 线的两两相交示意图

(8) 面的两两相交：生成新的线或面，其示意图如图 2-9 所示。

命令: AINP

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Intersect→Pairwise→Areas

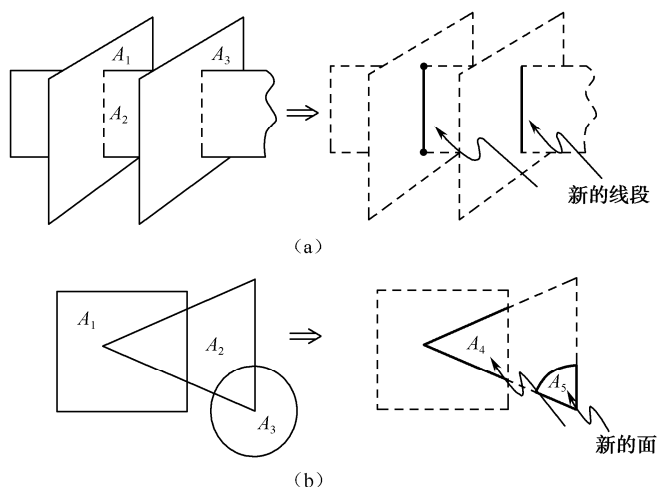


图 2-9 面的两两相交示意图

(9) 体的两两相交：生成新的面或体，其示意图如图 2-10 所示。

命令: VINP

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Intersect→Pairwise→Volumes

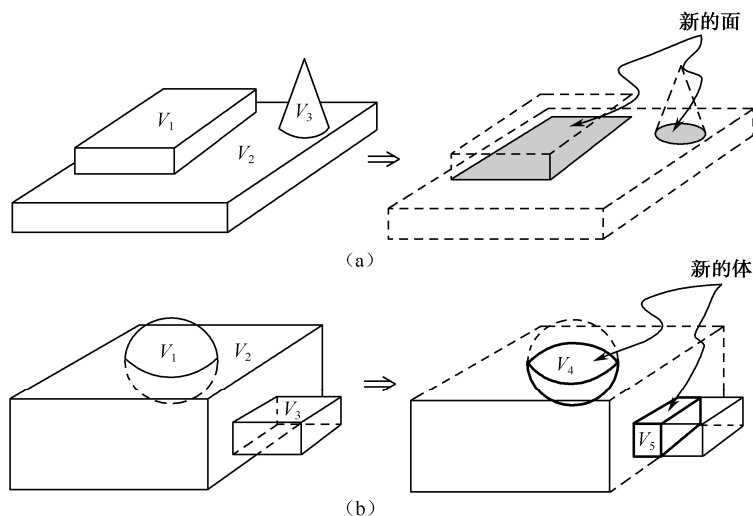


图 2-10 体的两两相交示意图

## 2. 加运算 (Add)

加运算会得到包含所有原始图元的新图元，这个生成的新图元是一个整体，没有接缝。



ANSYS 程序中的加运算只能对二维共面及三维实体进行操作。

(1) 面相加：只对两个面在同一面上的情况进行操作，生成新的面，其示意图如图 2-11 所示。

命令：AADD

GUI 操作路径：

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Add→Areas

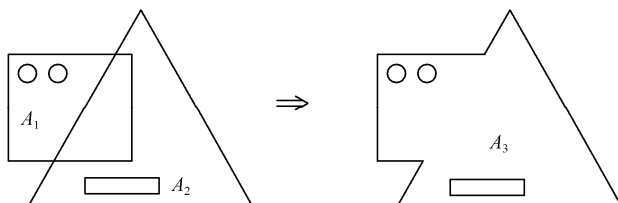


图 2-11 面相加示意图

(2) 体相加：生成新的体，其示意图如图 2-12 所示。

命令：VADD

GUI 操作路径：

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Add→Volumes

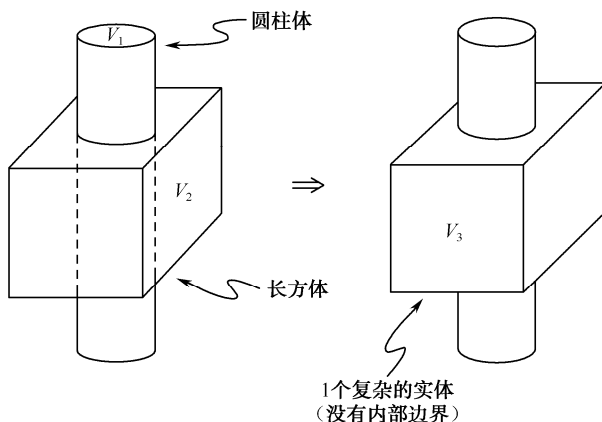


图 2-12 体相加示意图

### 3. 减运算 ( Subtract )

减运算包括线相减、面相减，以及体相减，会生成一个或多个相同维数的实体。

(1) 线相减：生成两条或一条新的线，其示意图如图 2-13 所示。

命令：LSBL

GUI 操作路径：

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Subtract→Lines

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Subtract→With Options→Lines

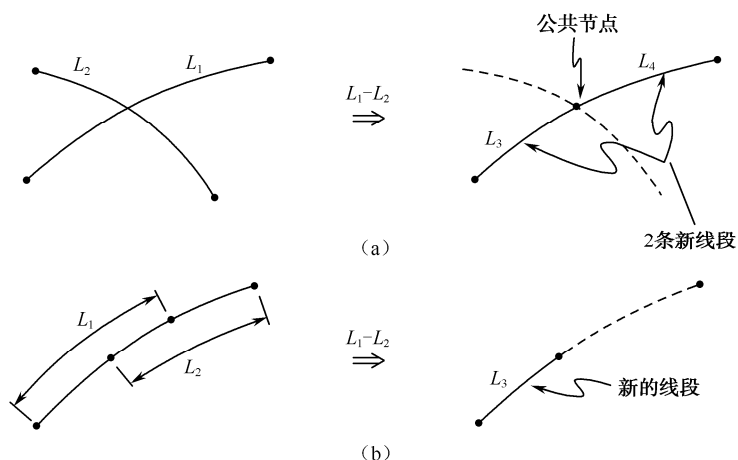


图 2-13 线相减示意图

(2) 面相减：生成两个或一个新的面，其示意图如图 2-14 所示。

命令：ASBA

GUI 操作路径：

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Subtract→Areas

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Subtract→With Options→Areas

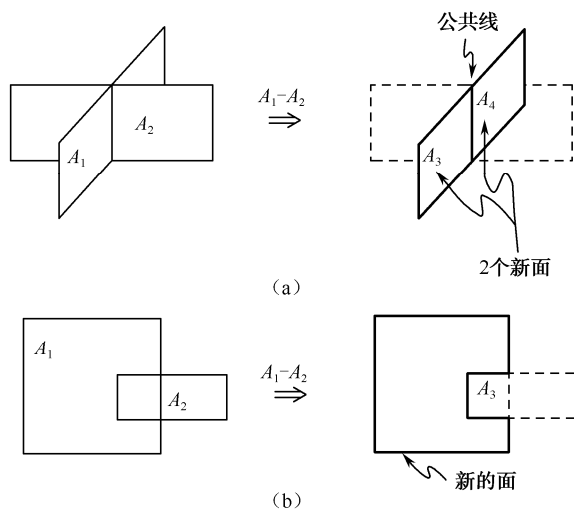


图 2-14 面相减示意图

(3) 体相减：生成新的体，其示意图如图 2-15 所示。

命令：VSBV

GUI 操作路径：

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Subtract→Volumes

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Subtract→With Options→Volumes

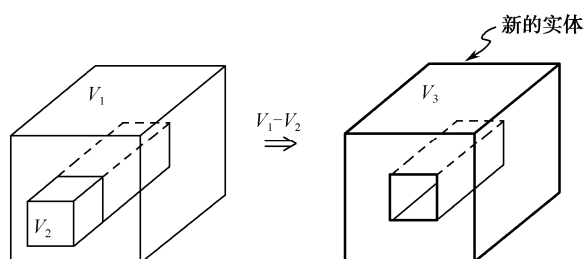


图 2-15 体相减示意图

#### 4. 分割运算 (Divide)

分割运算是将一个实体用另外一个实体分割成多个图元。ANSYS 软件提供线、面、体，以及工作平面的分割运算。

(1) 线分割线：生成新的线，产生交点。

命令：LSBL

GUI 操作路径：

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Divide→Line by Line

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Divide→With Options→Line by Line

(2) 面分割线：生成两段不同的线，其示意图如图 2-16 所示。

命令：LSBA

GUI 操作路径：

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Divide→Line by Area

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Divide→With Options→Line by Area

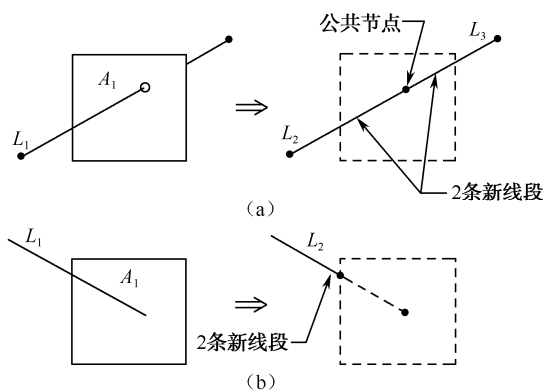


图 2-16 面分割线示意图

(3) 体分割线。

命令：LSBV

GUI 操作路径：

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Divide→Line by Volume

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Divide→With Options→Line by Volume

(4) 工作平面分割线：生成两条新的线，其示意图如图 2-17 所示。

命令：LSBW

GUI 操作路径：

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Divide→Line by WrkPlane

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Divide→With Options→Line by WrkPlane

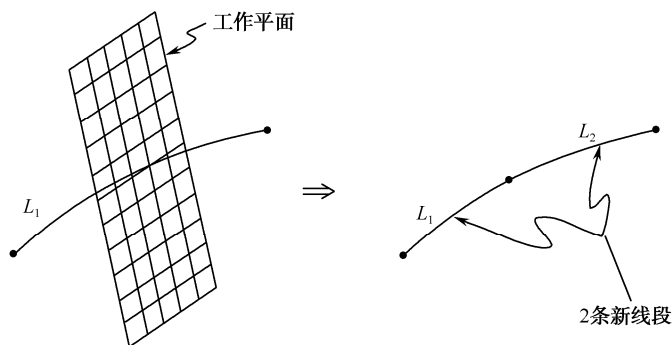


图 2-17 工作平面分割线示意图

(5) 线分割面：在同一平面内，生成新的两个面，其示意图如图 2-18 所示。

命令：ASBL

GUI 操作路径：

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Divide→Area by Line

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Divide→With Options→Area by Line

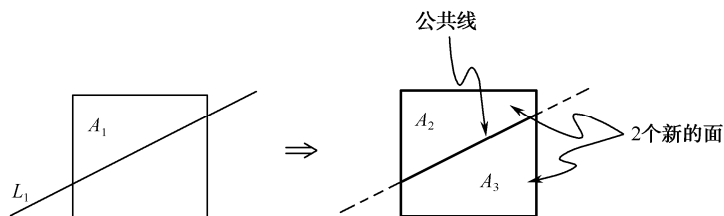


图 2-18 线分割面示意图

(6) 面分割面：生成新的两个面。

命令：ASBA

GUI 操作路径：

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Divide→Area by Area

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Divide→With Options→Area by Area

(7) 体分割面：产生新的面，其示意图如图 2-19 所示。

命令：ASBV

GUI 操作路径：

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Divide→Area by Volume

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Divide→With Options→Area by Volume

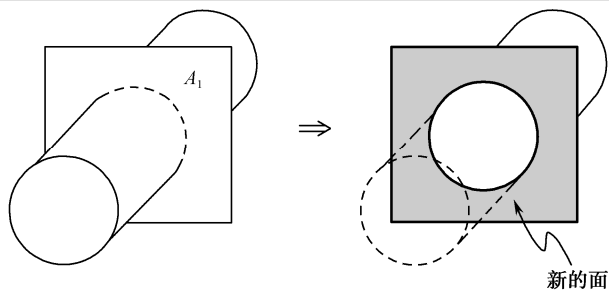


图 2-19 体分割面示意图

(8) 工作平面分割面：生成两个新的面，其示意图如图 2-20 所示。

命令：ASBW

GUI 操作路径：

Main Menu→Preprocessor→Operate→Divide→Area by WrkPlane

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Divide→With Options→Area by WrkPlane

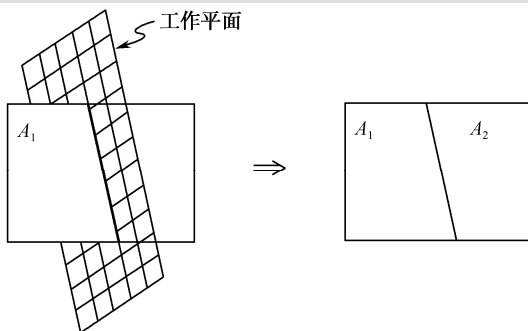


图 2-20 工作平面分割面示意图

(9) 面分割体：生成两个不同的体，其示意图如图 2-21 所示。

命令：VSBA

GUI 操作路径：

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Divide→Volume by Area

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Divide→With Options→Volume by Area

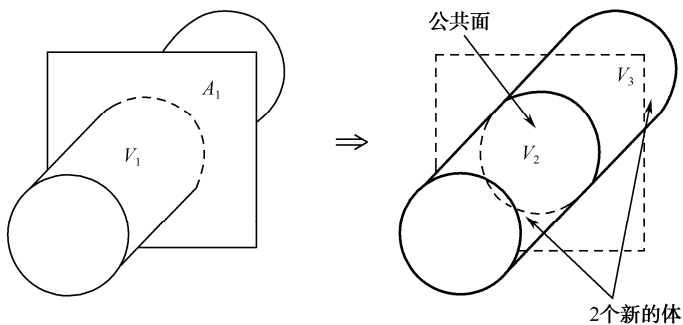


图 2-21 面分割体示意图

(10) 工作平面分割体：生成两个体，其示意图如图 2-22 所示。

命令：VSBW

GUI 操作路径：

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Divide→Volu by WrkPlane

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Divide→With Options→Volu by WrkPlane

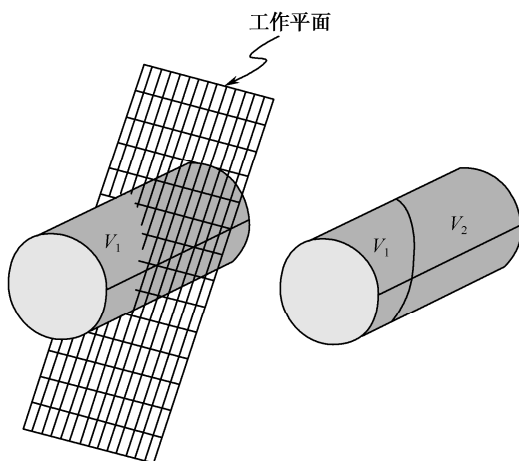


图 2-22 工作平面分割体示意图

## 5. 搭接运算 (Overlap)

搭接命令用于连接两个或多个图元，或生成更多个新的图元，搭接命令与加命令类似，区别是搭接命令在搭接域周围生成多个边界。因此，搭接生成的图元比加运算生成的图元更容易划分网格。

(1) 线搭接：生成多个新的线及节点，其示意图如图 2-23 所示。

命令：LAP

GUI 操作路径：

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Overlap→Lines

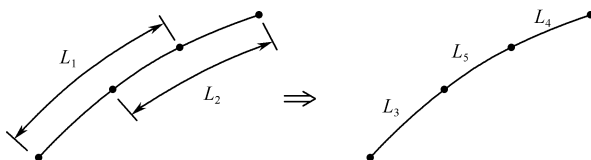


图 2-23 线搭接示意图

(2) 面搭接：生成多个新的面，其示意图如图 2-24 所示。

命令：AOVLAP

GUI 操作路径：

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Overlap→Areas

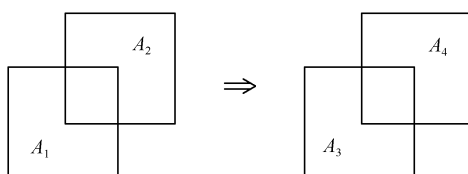


图 2-24 面搭接示意图

(3) 体搭接：生成多个体，其示意图如图 2-25 所示。

命令：VOVLAP

GUI 操作路径：

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Overlap→Volumes

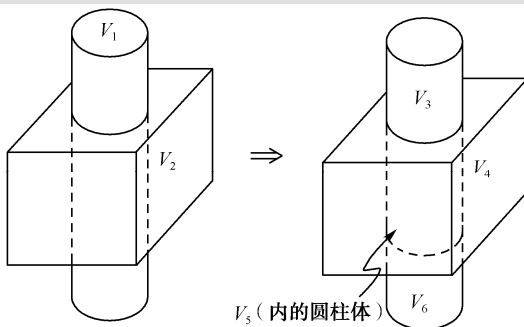


图 2-25 体搭接示意图

## 6. 分块连接 (Partion)

分块连接用于连接多个图元，以便生成更多的新图元。

(1) 线的分块连接：生成多条线，其示意图如图 2-26 所示。

命令：LPTN

GUI 操作路径：

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Partition→Lines

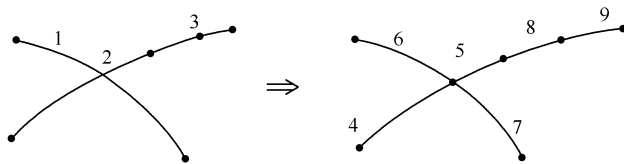


图 2-26 线的分块连接示意图

(2) 面的分块连接：生成多个面，其示意图如图 2-27 所示。

命令：APTN

GUI 操作路径：

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Partition→Areas

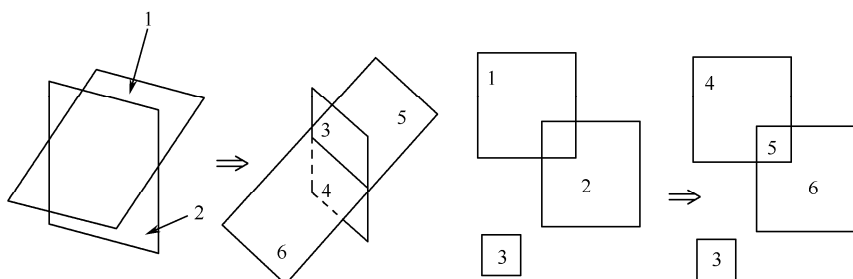


图 2-27 面的分块连接示意图

(3) 体的分块连接：生成多个体，其示意图如图 2-28 所示。

命令：VPTN

GUI 操作路径：

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Partition→Volumes

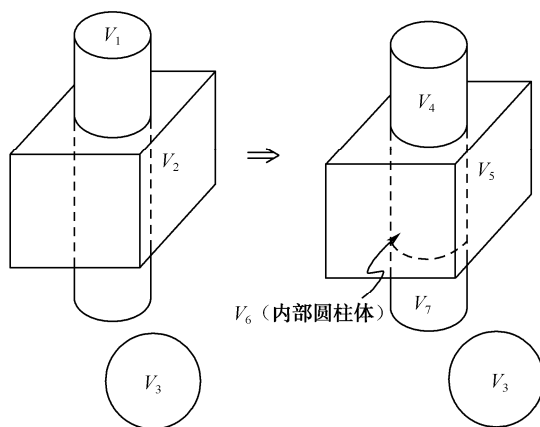


图 2-28 体的分块连接示意图

## 7. 黏结 (Glue)

黏结命令与搭接命令类似，知识图元之间在公共边界处相关，知识公共边界处的维数低于原来的图元，这些图元是相互独立的，只是在边界上搭接。

(1) 线的黏结：其示意图如图 2-29 所示。

命令：LGLUE

GUI 操作路径：

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Glue→Lines

(2) 面的黏结：其示意图如图 2-30 所示。

命令：AGLUE

GUI 操作路径：

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Glue→Areas



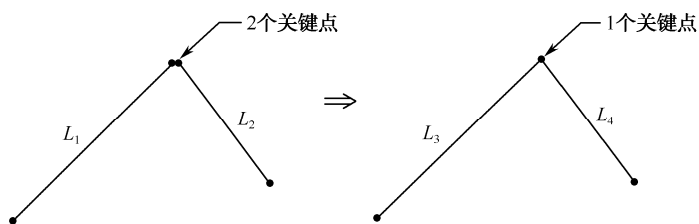


图 2-29 线的黏结示意图

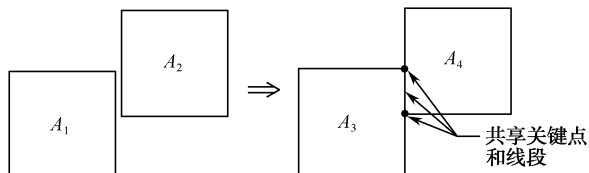


图 2-30 面的黏结示意图

(3) 体的黏结：其示意图如图 2-31 所示。

命令：VGLUE

GUI 操作路径：

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Glue→Volumes

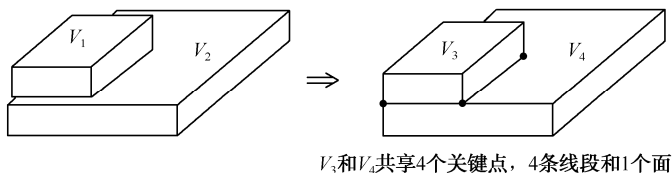


图 2-31 体的黏结示意图

## 2.2.4 从其他系统导入模型

### 1. 导入 IGES 文件

IGES 被认为是在不同 CAD 与 CAE 系统之间可以作为交换的中间标准格式的几何模型文件，可以按照下面的方法从 ANSYS 中导入 IGES 文件，依次单击：Utility Menu→File→Import→IGES，弹出如图 2-32 所示的对话框。

### 2. Pro/E 接口

要导入在 Pro/E 中创建的 CAD 模型，依次单击：Utility Menu→File→Import→Pro/E，弹出如图 2-33 所示的对话框，文件的格式为\*.prt\*。

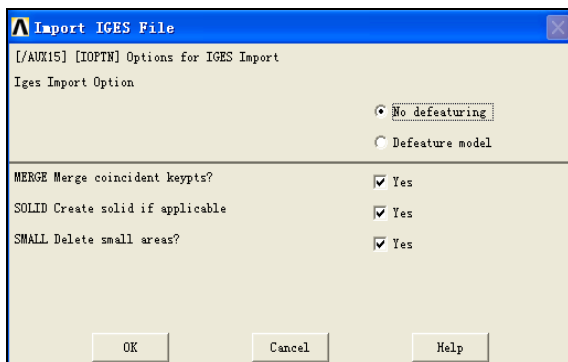


图 2-32 “Import IGES File”对话框

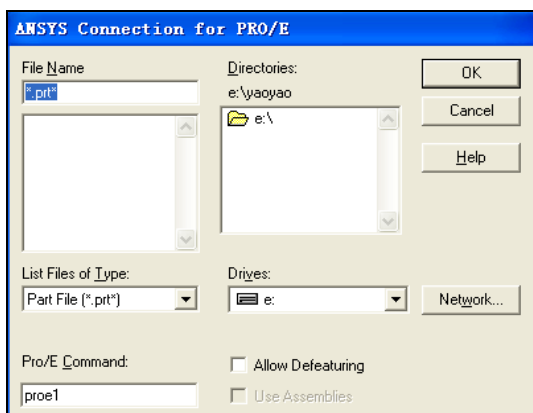


图 2-33 “ANSYS Connection for PRO/E”对话框

### 3. UG 接口

要导入在 UG 中创建的 CAD 模型，依次单击：Utility Menu→File→Import→UG，弹出如图 2-34 所示的对话框，文件的格式为\*.prt。

### 4. SAT 接口

要导入在 SAT 中创建的 CAD 模型，依次单击：Utility Menu→File→Import→SAT，弹出如图 2-35 所示的对话框，文件的格式为\*.sat。

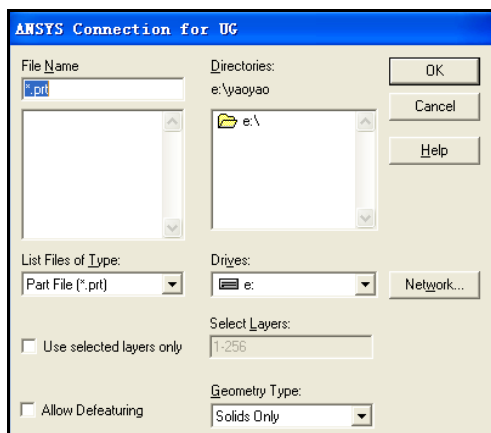


图 2-34 “ANSYS Connection for UG”对话框

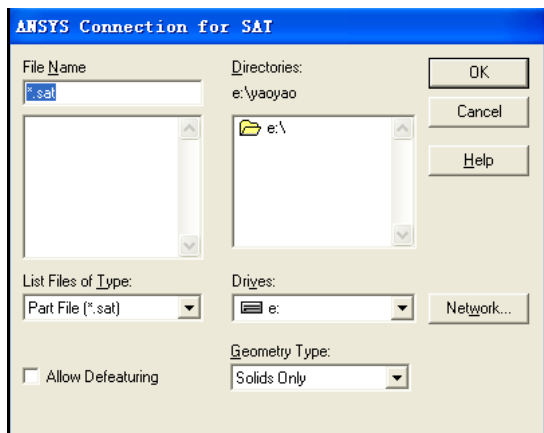


图 2-35 “ANSYS Connection for SAT”对话框

### 5. PARA 接口

要导入在 PARA 中创建的 CAD 模型，依次单击：Utility Menu→File→Import→PARA，弹出如图 2-36 所示的对话框，文件的格式为\*.x\*\_t。

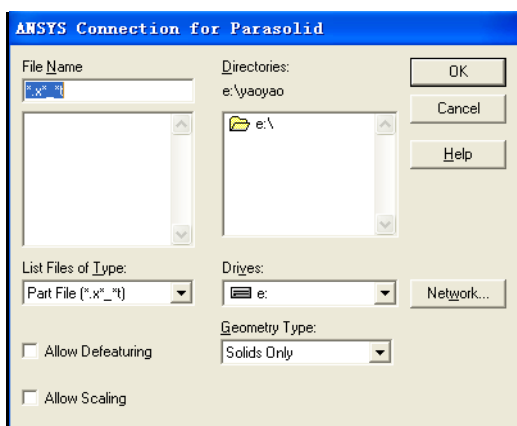


图 2-36 “ANSYS Connection for Parasolid”对话框

## 2.3 创建有限元模型

创建合理的有限元模型，是有限元分析精度的关键因素之一。因此，对于单元属性和网格划分的合理选择和控制是获取合理分析结果的前提。

### 2.3.1 设定单元属性

#### 1. 定义单元类型

为适应不同的有限元分析需要，ANSYS 提供了 200 余种不同单元类型，主要包括线单元、壳单元、实体单元（包括 2D 和 3D 实体单元），以及特殊的接触单元、间隙单元和表面效应单元等。下面主要介绍结构分析中常用到的 3 种单元类型。

（1）线单元分为杆单元、梁单元和弹簧单元。

（2）壳单元主要应用于薄板或曲面类分析模型，注意壳单元的厚度不能超过面内尺寸的 1/10。

（3）二维实体单元只能在全局坐标系下 XY 面内建模，主要用于模拟实体的截面；三维实体单元则适用于由于几何形状、材料、载荷或分析要求考虑细节等原因，而无法简化为平面问题的建模分析。

#### 2. 定义单元类型的操作步骤

以定义杆单元为例，描述定义单元类型的基本步骤如下所述。

（1）依次单击：Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete，弹出“Element Types”对话框，如图 2-37 所示。

（2）单击“Add”按钮，弹出“Library of Element Types”（单元类型）对话框，如

图 2-38 所示。在“Library of Element Types”选项的左列表框中选择“Structural Mass→Link”选项，右列表框中选择“2D spar 1”选项；在“Element type reference number”选项的输入栏中输入“1”（默认）；单击“OK”按钮关闭该对话框。

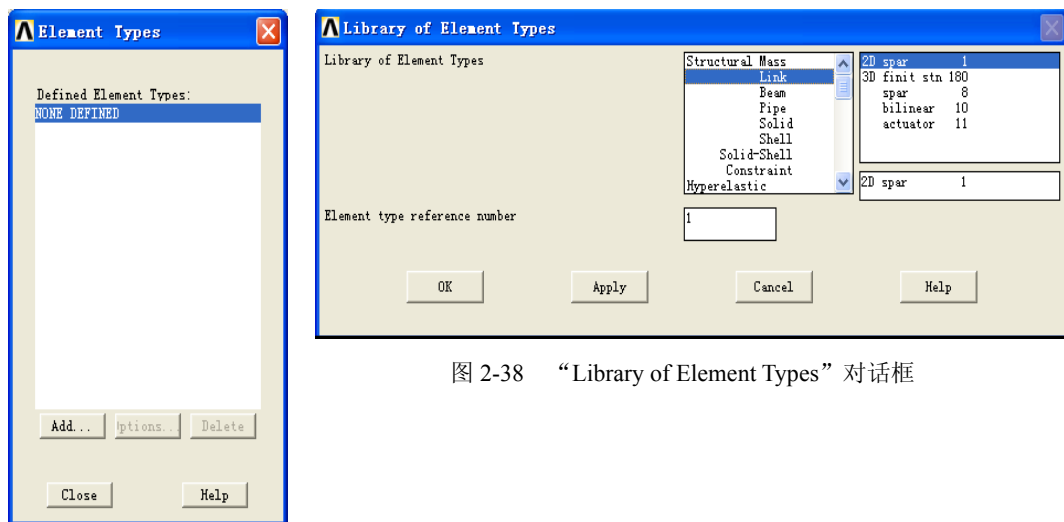


图 2-38 “Library of Element Types”对话框

图 2-37 “Element Types”对话框

(3) 单击“Element Types”对话框中的“Close”按钮，完成单元类型的添加，如图 2-39 所示会显示出已定义好的单元类型。

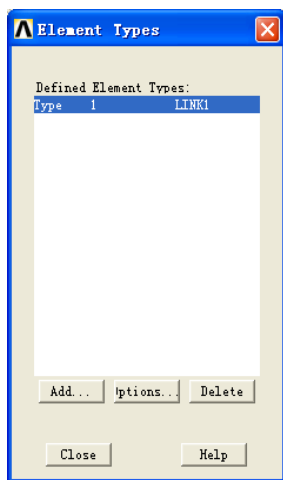


图 2-39 定义好单元类型的“Element Types”对话框

对应命令流：

```
/PREP7
ET, 1, LINK1
```

### 3. 定义单元实常数

定义单元实常数依赖于所选单元的类型，典型的单元实常数包括厚度、截面面积、高度等。以定义 LINK1 杆单元为例，描述定义单元类型的基本步骤如下所述。

(1) 依次单击：Main Menu→Preprocessor→Real Constants→Add/Edit/Delete，弹出“Real Constants”对话框，如图 2-40 所示。

(2) 单击“Add”按钮，弹出“Element Type for Real Constants”对话框，如图 2-41 所示，显示所定义的单元类型 LINK1 处于选中状态。

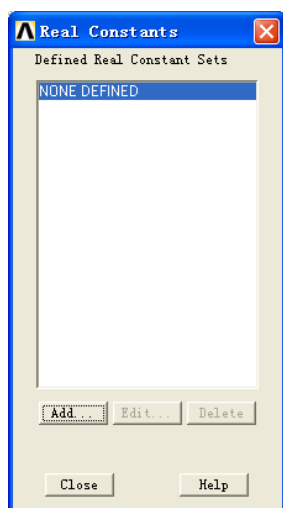


图 2-40 “Real Constants”对话框

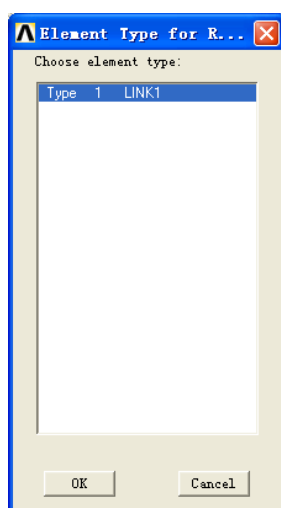


图 2-41 “Element Type for Real Constants”对话框

(3) 单击“OK”按钮后，弹出“Real Constant Set Number 1, for LINK1”对话框，如图 2-42 所示。输入截面面积（AREA）和初始应变（ISTRN），单击“OK”按钮完成 LINK1 单元实常数设置。

对应命令流：

```
R, 1, 10, 0
```

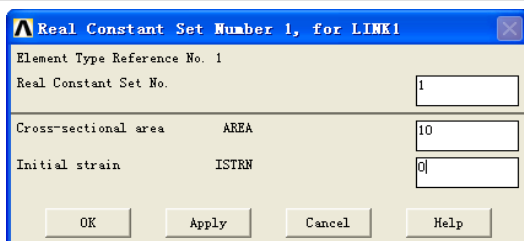


图 2-42 “Real Constant Set Number 1, for LINK1”对话框

### 4. 定义材料属性

材料属性是与几何模型无关的应力应变本构关系，可以是线性或非线性，各向同性、正

交异性或非弹性的。典型的材料特性包括弹性模量、密度、热膨胀系数等，它们都是与温度相关的。

#### 1) 线性材料

以各向同性的线弹性材料为例，描述用户定义材料属性的步骤如下所述。

(1) 依次单击: Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models, 弹出“Define Material Model Behavior”对话框, 如图 2-43 所示。选择该对话框右列表框中的 Structural→Linear→Elastic→Isotropic 选项, 弹出“Linear Isotropic Properties for Material Number 1”对话框, 如图 2-44 所示。在“EX”选项的输入栏中输入弹性模量为“ $2.1\text{e}11$ ”, 在“PRXY”选项的输入栏中输入泊松比为“0.3”。

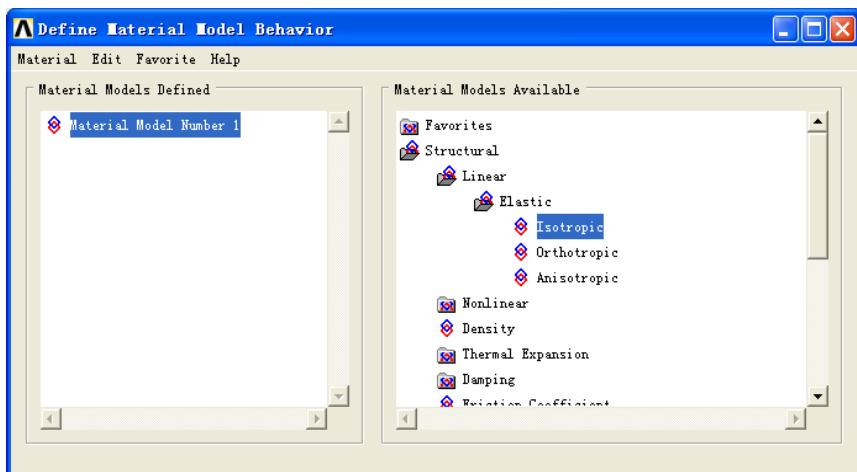


图 2-43 “Define Material Model Behavior”对话框

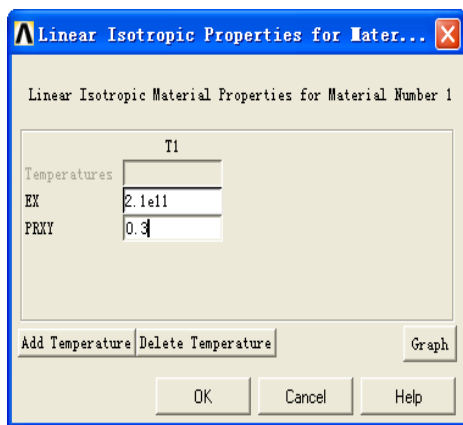


图 2-44 “Linear Isotropic Properties for Material Number 1”对话框

(2) 在图 2-44 中, 单击“Add Temperature”选项卡, 如图 2-45 所示。进行随温度变化的弹性模量和泊松比设置, 单击“Graph”按钮, 可以用图形显示所定义的材料属性曲线, 如图 2-46 所示。

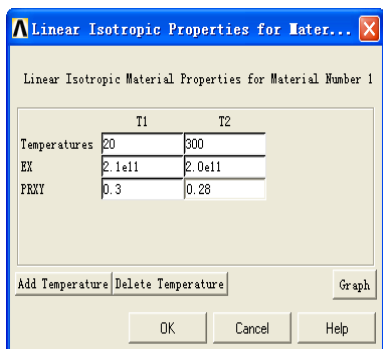


图 2-45 “Add Temperature” 选项卡

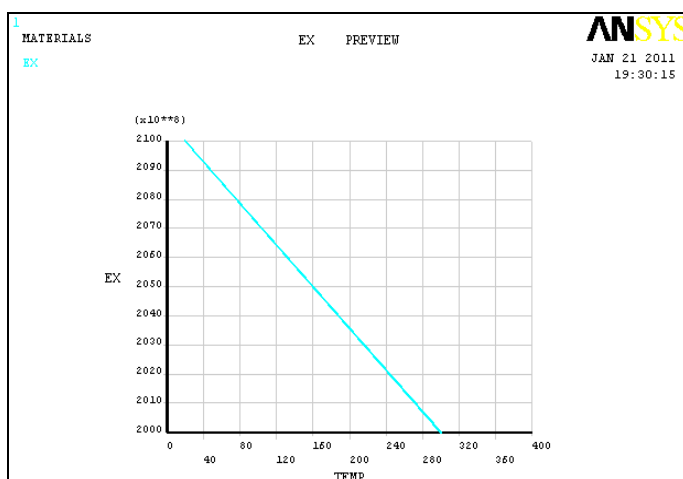


图 2-46 图形显示材料属性曲线

(3) 单击“OK”按钮，完成线弹性材料属性定义。

**注意：**ANSYS 中每一组材料属性对应一个材料参考号；设置材料常数必须保证单位量纲的统一。

对应命令流：

```
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,20
MPTEMP,2,300
MPDE,EX,1
MPDE,PRXY,1
MPDATA,EX,1,,2.1e11
MPDATA,EX,1,,2.0e11
MPDATA,PRXY,1,,0.3
MPDATA,PRXY,1,,0.28
```

## 2) 非线性材料

非线性分析中需要定义非线性材料，如理想弹塑性、线性强化弹塑性等材料本构关系。非线性本构，必须在定义其弹性段的性质后进行。定义较为复杂的多线性材料本构的基本步骤如下：

(1) 按照上述定义线弹性本构的步骤完成线性段的特性设置；

(2) 在“Define Material Model Behavior”对话框右侧选项框中依次单击：Structural→Nonlinear→Inelastic→Rate Independent→Isotropic Hardening Plasticity→Mises Plasticity→Multilinear，如图 2-47 所示。随后弹出“Multilinear Isotropic Hardening for Material Number 1”对话框，如图 2-48 所示。在“STRAIN”选项的输入栏中输入应变量为“0.0001”，在“STRESS”选项的输入栏中输入应力为“325”。

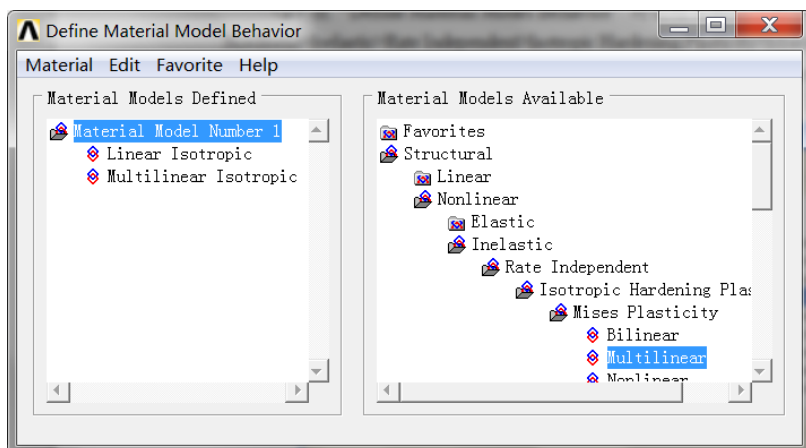


图 2-47 “Define Material Model Behavior”对话框

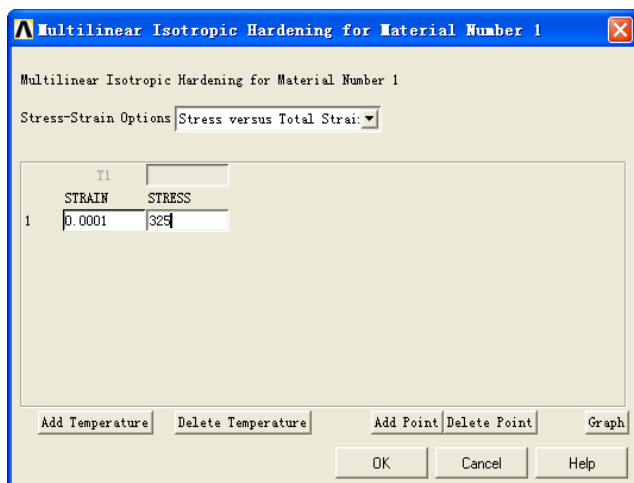


图 2-48 “Multilinear Isotropic Hardening for Material Number 1”对话框

(3) 单击“Add Point”选项卡，添加应力应变数据点。依次输入三组数据，分别为（0.0005，400）、（0.0008，450）和（0.002，500），单击“Graph”按钮，在图形窗口中显示材料本构曲线，如图 2-49 所示。

ANSYS13.0 针对各种类型的问题，提供了多种材料模型，用户应当根据实际问题进行合理地选择。定义其他材料本构可以参照以上步骤，一些细节问题请参看 ANSYS13.0 的帮助文件。

## 5. 赋予单元属性

前面已经学习了如何定义单元类型、单元实常数，以及材料属性，现在将实现如何正确地赋予单元属性。赋予单元属性，既可以在网格划分前特别指定对象实体，也可以在直接生成单元模型前进行设置。此外，某些情况下 ANSYS 会自动对单元网格关联相应单元属性。下面介绍赋予单元属性的方法。



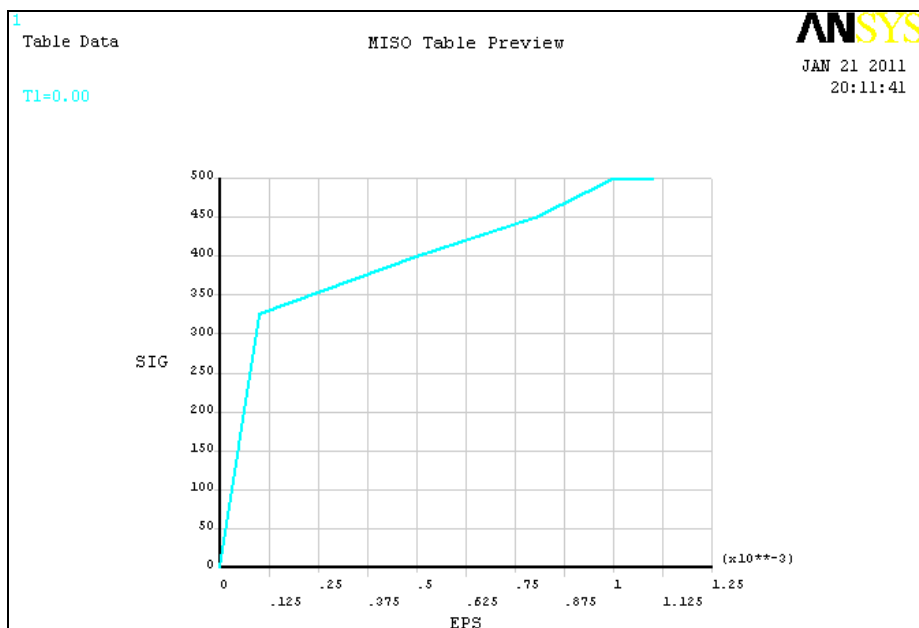


图 2-49 图形显示材料本构曲线

### 1) 直接赋予属性

直接赋予面属性的操作步骤如下所述。

(1) 依次单击: Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→Picked Areas, 给所选择的面赋予属性。弹出“Area Attributes”拾取对话框, 如图 2-50 所示, 也可以在图形窗口中用鼠标拾取要选择的面, 还可以在空白输入栏中输入面对应的编号。

(2) 单击“OK”按钮, 弹出“Area Attributes”对话框, 如图 2-51 所示, 在“MAT Material number”选项的下拉列表中选择所需的已定义材料编号, 在“REAL Real constant set number”选项的下拉列表中选择所需的已定义实常数编号, 以及在“TYPE Element type number”选项的下拉列表中选择所需的已定义单元属性。

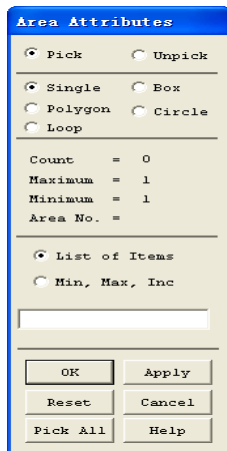


图 2-50 “Area Attributes”拾取对话框

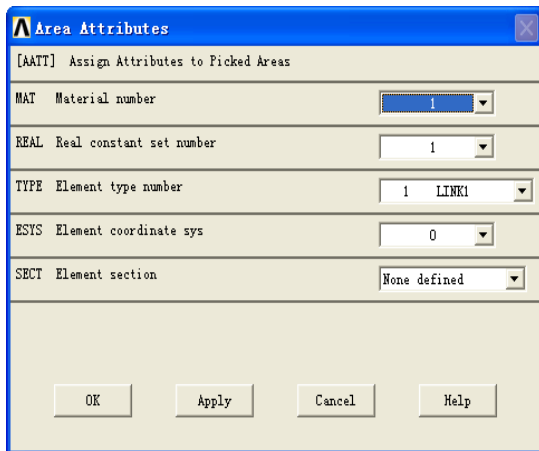


图 2-51 “Area Attributes”对话框

(3) 单击“OK”按钮，确认退出对话框，完成面属性的赋予操作。

对应的命令有关键点赋予属性（KATT）、线赋予属性（LATT）、面赋予属性（AATT）和体赋予属性（VATT）。

## 2) 默认属性

在用户创建了某个实体后，ANSYS 会自动配置一个实体属性，若无特别需要更改属性设置，则可以选择默认属性设置。

GUI 操作路径：

Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→Default Attribs

在弹出的属性窗口中，单击“OK”按钮即可。

直接生成单元模型，在定义单元前，依次单击：Main Menu→Preprocessor→Modeling→Creat Elements→Elem Attributes，弹出“Element Attributes”对话框，如图 2-52 所示。根据需要可做相应的属性设置，如“[TYPE] Element type number”选项设置单元类型、“[MAT] Material number”选项控制材料类型，以及“[REAL] Real constant set number”选项控制常数设置。也可选择默认设置，单击“OK”按钮，确认退出对话框。

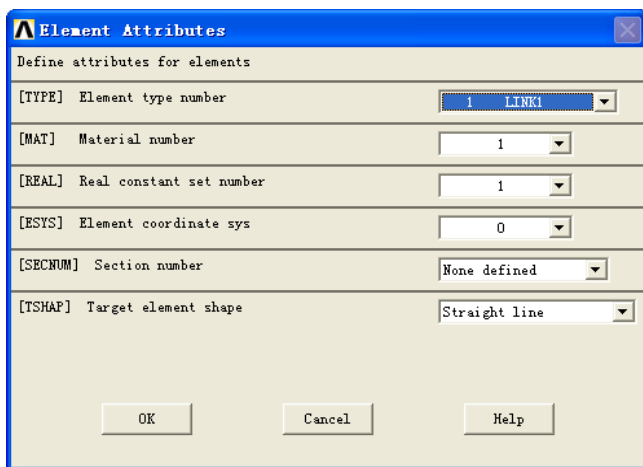


图 2-52 “Element Attributes”对话框

## 3) 直接分网

在完成了单元类型、实常数和材料属性设置后，用户可以选择直接进行网格划分，此时 ANSYS 会自动将定义的单元类型关联到相应的实体模型，为二维实体模型选择二维单元，为三维实体模型选择三维单元。

## 2.3.2 网格划分控制

完成了单元属性赋予后，必须对已有的实体模型进行单元网格划分，才能生成有限元计算所需的网格模型。但是，同样的实体模型可以采用不同的网格划分得到不同的有限元网格模型，而导致有限元分析的结果千差万别，甚至无法进行计算。因此，应当采用合适的网格

划分方式，尽量使其生成符合有限元计算精度要求的高质量的网格模型。

ANSYS 为用户提供了强大的网格划分控制工具。某些情况，默认的网格划分就足以满足精度要求，但是多数情况需要根据需要进行手动操作网格划分。ANSYS 提供了最常用的网格划分控制工具“MeshTool”，依次单击：Main Menu→Preprocessor→Meshing→MeshTool，即可打开“MeshTool”对话框，其中各选项的功能简要说明如图 2-53 所示。

**注意：**智能控制模式只能适用于自由网格划分方式。

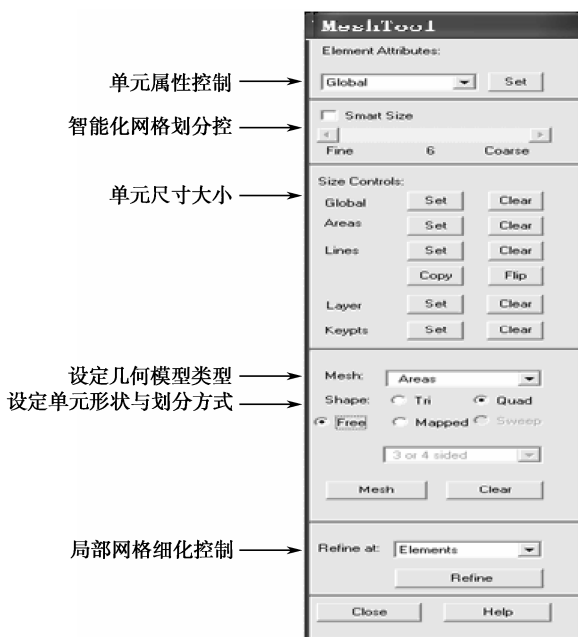


图 2-53 “MeshTool”对话框

在“Mesh”选项的下拉列表中，不同的实体模型需要选用不同形状类型的单元。其组合情况如下所述。

- (1) 体模型：网格划分如图 2-54 所示。
- (2) 面模型：可自由选择单元形状与网格划分方式，视具体情况而定。
- (3) 线模型和关键点模型：没有单元形状和网格划分方式选项。

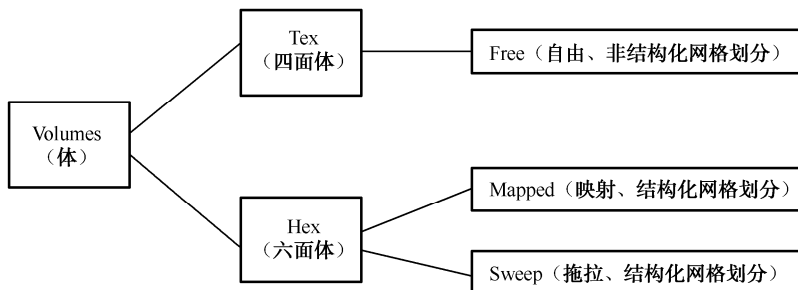


图 2-54 体模型网格划分

下面对网格划分过程中的一些问题做具体的介绍。

## 1. 设定单元尺寸

依次单击：Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls，弹出如图 2-55 所示的“Meshing”子菜单，对话框中各选项的意义介绍如下所述。

### 1) SmartSize 智能化网格划分

- (1) Adv Opts: 高级选项设置。
- (2) Status: 显示 SmartSize 设置情况。

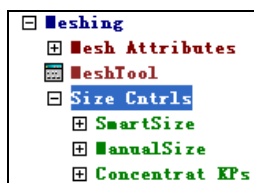
### 2) ManualSize 人工控制网格划分

- (1) Global: 设置整个模型的单元尺寸。单击该选项将弹出如图 2-55 (b) 所示的子菜单。

- ① Size: 设定单元边尺寸或边界线上单元种子数。
- ② Area Cntrls: 设置面网格划分参数，如缩放因子和过渡因子。
- ③ Volu Cntrls: 设置体网格划分参数，如四面体网格缩放因子。
- ④ Other: 控制默认单元尺寸，适用于映射网格。

- (2) Areas: 用于设置面模型网格单元划分。单击该选项将弹出如图 2-55 (c) 所示的子菜单。

- ① All Areas: 对所有面设置单元尺寸。
- ② Picked Areas: 对选定的面设置单元尺寸。
- ③ Clr Size: 删除已有面单元尺寸设置。
- (3) Lines: 用于设置模型中线上单元尺寸。
- (4) Keypoints: 用于设置毗邻关键点的单元尺寸。
- (5) Layers: 设置模型中线上单元的等分数和分割步长比率。



(a)



(b)



(c)

图 2-55 “Meshing”子菜单

### 3) Concentrat KPs 集中点的单元尺寸设置

该命令适用于存在应力集中的模型和对裂纹尖端的模拟，单击“Creat”按钮，在奇异面网格中创建一个关键点，然后在“List”菜单下设置单元尺寸选项。

**注意：**每个被网格化的面上只允许存在一个集中点。

## 2. 网格划分选项

依次单击：Main Menu→Preprocessor→Mesh Opts，弹出“Mesher Options”对话框，如图 2-56 所示，该对话框中各选项意义介绍如下所述。

- (1) AMESH Triangle Mesher: 三角形面单元网格划分器。
- (2) QMESH Quad Mesher: 四边形面单元网格划分器。

- (3) VMESH Tet Mesher: 四面体单元网格划分器。
- (4) TIMP Tet Improvement in VMESH: 设置下一次自由体网格划分时, 选择已有四面体网格改进水平。
- (5) PYRA Hex to Tet Interface: 过渡为金字塔单元选项。
- (6) SPLIT Split poor quality quads: 对违反形状误差或警告限制的四边形网格进行分割处理选项。
- (7) KEY Mesher Type: 选择网格划分方式, 默认为自由网格划分。
- (8) KEY Midside node placement: 指定中间节点的位置。
- (9) KEY Pattern Key: 选择三角形单元模式。

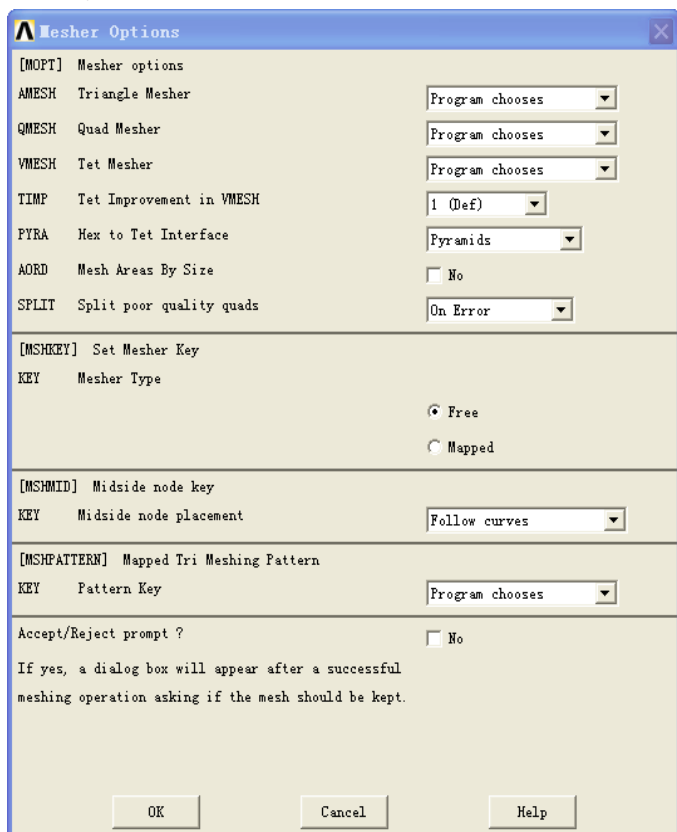


图 2-56 “Mesher Options”对话框

### 3. “SmartSize” 网格尺寸控制

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrl→SmartSize→Adv Opts, 弹出“Advanced SmartSize Settings”对话框, 如图 2-57 所示, 该对话框中各选项的意义介绍如下所述。

- (1) SIIE Global element size: 设置边界线上的单元尺寸大小。
- (2) FAC Scaling Factor: 比例因子。

(3) EXPND Expansion (Contraction): 缩放因子, 基于面边界单元尺寸, 对面内单元尺寸进行缩放设置。

(4) TRANS Transition Factor: 过渡因子, 用于控制面边界到面内单元网格尺寸变化的快慢。

(5) ANGL Lower-order Elements: 设置曲线上低阶单元的最大跨角。

(6) ANGH Higher-order Elements: 设置曲线上高阶单元的最大跨角。

(7) GRATIO Proximity Growth Ratio: 设置用于临近检查的许可增长值。

(8) SMHLC Small Hole Coarsening: 小孔粗化设置。

(9) SMANC Small Angle Coarsening: 小角度粗化设置。

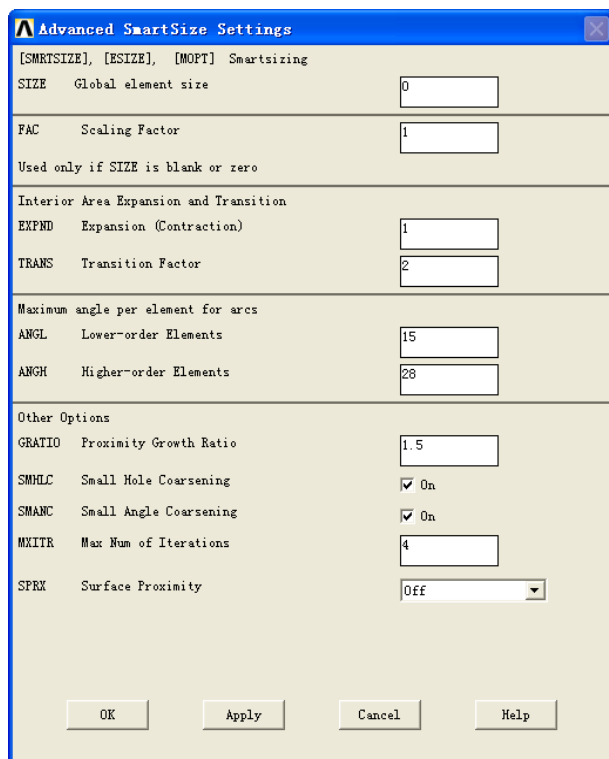


图 2-57 “Advanced SmartSize Settings”对话框

#### 4. 单元形状控制

ANSYS 中允许用户将二维单元定义成三角形或四边形, 三维单元定义成六面体或四面体。参见 2.3.2 节介绍的网格划分控制, 用户选好单元形状后即可对几何对象生成需要的单元。下面介绍由几何实体划分单元的操作方式及相应的命令。

##### 1) 在关键点处生成节点或节点单元

命令: KMESH

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Keypoints

## 2) 在线上生成节点或线单元

命令: LMESH

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Lines

## 3) 划分面生成面单元

命令: AMESH

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Areas→Mapped-3 or 4 sides→Mapped-By Corners→Free  
→Target Surf

## 4) 划分体生成体单元

命令: VMESH

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Areas→Mapped-4 or 6 sides→Free

## 2.3.3 自由网格划分与映射网格划分

在划分网格之前,选择采用自由网格划分还是映射网格划分是很关键的。下面简单介绍两种划分方式。

### 1. 自由网格划分

自由网格划分对实体没有特殊的要求,也没有特定的准则。它划分需要的单元形状取决于划分对象是面还是体:自由面网格可由三角形单元和四边形单元的任意组合组成;自由体网格则限定为四面体单元。

### 2. 映射网格划分

映射网格划分要求面或体是规则的形状,且必须遵循一定的准则。相比于自由网格划分而言,映射面网格只能包含三角形单元或四边形单元,不能混合使用;映射体网格只包含六面体单元。映射网格具有规整的形状,且成排排列。

对于自由网格划分,用户无法控制内部节点位置。而对于映射网格划分,可以控制内部节点的位置,且必须需要事先规划好如何进行网格化,如二维平面结构,要求必须为四边形和三角形简单结构的组合;三维结构,则一定为六面体结构的组合。

#### 1) 自由网格划分

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Areas→Free;

Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Volumes→Free

#### 2) 映射网格划分

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Areas→Mapped-3 or 4 sides;

Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Areas→Mapped-By Corners;  
Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Volumes→Mapped-4 or 6 sides

也可以采用命令 MSHKEY 指定网格划分方式。例如,

MSHKEY, 0	! 自由网格划分
MSHKEY, 1	! 映射网格划分

## 2.3.4 网格质量检查和修改

通过网格质量的检查和修改,可以完善网格划分,使分析结果尽可能的准确。其包含的内容主要有单元形状检查、网格局部细化、改进网格等操作。

### 1. 单元形状检查

模型中不好的单元网格会导致错误的分析结果,ANSYS 会自动对生成的单元形状进行检查,必要时给出警告或错误信息。通常 ANSYS 自动检查的结果只能作为一个大致参考意见,故而将形状好坏的判定交给了用户。

进入单元形状检查的操作是依次单击: Main Menu→Preprocessor→Checking Ctrls, 进入单元形状检查子菜单,下面简单介绍各选项的功能。

1) Model Checking 选项的作用是模型校验。

Model Checking 选项的作用是模型校验。

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Checking Ctrls→Model Checking, 弹出“Model Checking Controls”对话框,如图 2-58 所示, “[MODMSH] Model/FEA checking”选项的下拉列表中各选项功能如下。

(1) Give status: 给出当前状态,仅适用于“CHECK”选项。

(2) Deactivate check: 禁止模型相互对照检查。

(3) Reactivate check: 对实体模型执行进一步检查。

(4) Detach: 分离有限元模型和几何实体模型,即消除二者的关联性,执行该操作后就不能在几何模型上施加载荷、清除网格等操作。

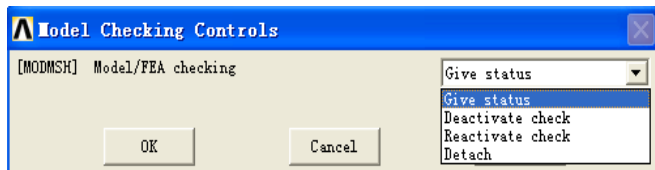


图 2-58 “Model Checking Controls”对话框

2) Shape Checking 选项的作用是单元形状校验。

Shape Checking 选项的作用是单元形状校验

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Checking Ctrls→Shape Checking, 弹出“Shape Checking Controls”对话框,如图 2-59 所示, “[SHPP] Level of shape checking Change Settings”选项的下拉列表中各选项功能如下。



(1) On w/Error msg: 用设定好的警告和误差极限进行单元测试, 查过误差极限的单元就会产生一个出错信息, 甚至导致网格划分失败。

(2) On w/Warning msg: 用设定好的警告和误差极限进行单元测试, 查过误差极限的单元就会产生一个警告信息, 并不改变当前单元形状参数的限制。

(3) Off: 关闭单元形状检查。

(4) Status: 列出单元检查的结果与当前有效的形状参数限制。

(5) Restore Defaults: 重置单元形状参数限制为默认值。

(6) Summary: 列出所选单元形状测试结果。

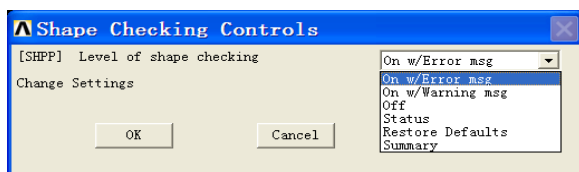


图 2-59 “Shape Checking Controls”对话框

3) Toggle Checks 选项的作用是触发校验

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Checking Ctrl→Toggle Checks, 弹出“Toggle Shape Checks”对话框, 如图 2-60 所示, 各选项功能见图。

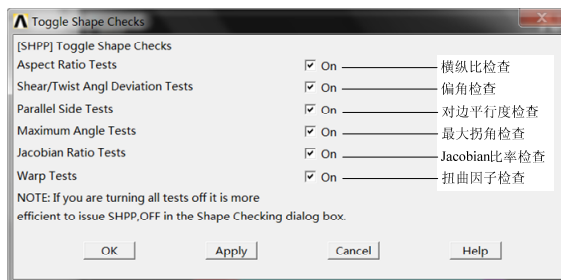


图 2-60 “Toggle Shape Checks”对话框

## 2. 网格局部细化

通常在用户感兴趣的区域或应力集中的区域, 对网格密度的要求很高, 因此 ANSYS 提供了对已有网格进行局部细化的功能, 具体操作如下所述。

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Meshing→Modify Mesh, 弹出如图 2-61 所示子菜单, 其各选项功能介绍如下。

(1) Refine At-Nodes: 对指定节点周围的网格进行细化;

(2) Refine At-Elements: 对指定单元周围的网格进行细化;

(3) Refine At-Keypoints: 对指定关键点周围的网格进行细化;

(4) Refine AtLines: 对指定线周围的网格进行细化;

(5) Refine At-Areas: 对指定面周围的网格进行细化;

(6) Refine At-All: 对所有网格进行细化;

- (7) Improve Tets-Volumes: 改进选定体上四面体单元的品质;
- (8) Improve Tets-Detached Elms: 改进选定且与体不相关联的四面体单元的品质;
- (9) Change Tets: 由 20 节点退化的四面体单元转变成与之相对应的退化为 10 节点的单元。

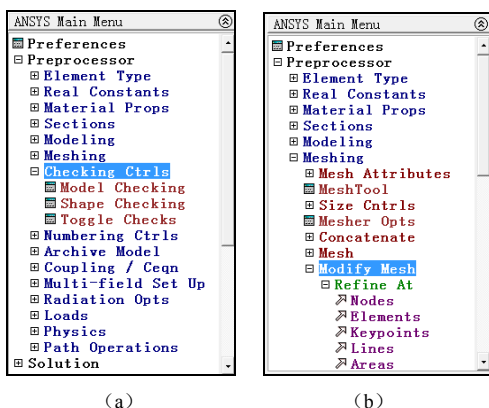


图 2-61 单元形状检查和网格局部细化子菜单

**注意:** 非四面体组成的体网格、包含接触单元的区域、存在表面单元的区域和模型中存在约束方程或节点上有初始条件的情况下不能进行局部网格细化。

### 3. 改进网格

ANSYS 中提供的改进操作主要有面交换技术、节点平滑技术和其他技术,用于减少畸形四面体单元数量和改进全部单元品质。

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Meshing→Modify Mesh→Improve Tets。

Volumes 选项用于对指定体上网格单元进行品质改进,在指定实体后会提醒用户是否进行边界修改(边界修改包括更改边界单元表面和另外边界节点的连通性); Detached Elms 选项用于改进与体不相关联的四面体单元品质。

**注意:** 只能针对直接由节点生成的单元模型。

## 2.3.5 直接生成单元网格的方法

ANSYS 建立有限元模型方法,除了通过对几何实体模型划分网格生成外,还可以直接生成节点,再由节点生成单元。直接生成单元网格的方法,主要用于简单模型的分析,而且不能使用网格细化工具。

### 1. 创建节点

#### 1) 直接生成节点

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Nodes

弹出如图 2-62 所示的“Nodes”子菜单，其中各主要命令的功能意义如下所述。

- (1) On Working Plane: 通过工作平面坐标系定义节点。
- (2) In Active CS: 通过当前激活状态的坐标系定义节点。
- (3) At Curvature Ctr: 在弧线的曲率中心生成节点。
- (4) On Keypoint: 在已有关键点处生成节点。
- (5) Fill between Nds: 在已有节点连线上生成节点。
- (6) Quadratic Fill: 从 3 个节点的二次线上生成节点。

## 2) 其他节点创建方法

- (1) 复制已有节点。

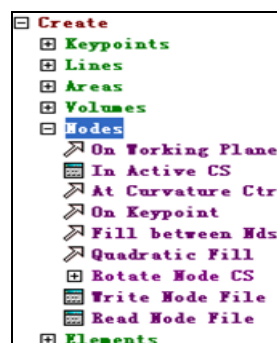


图 2-62 “Nodes”子菜单

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Copy→Nodes- Copy

- (2) 比例缩放已有节点。

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Copy→Nodes-Scale&Copy

Main Menu→Preprocessor→Operate→Scale→Nodes-Scale&Copy

- (3) 镜像已有节点。

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Reflect→Nodes

## 2. 创建单元

创建单元前，必须指定要创建单元的属性。

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Creat→Elements→Elem Attibutes

具体参数的设置参见设置单元属性介绍。

创建单元的方法如下所述。

- 1) 由节点生成单元

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Creat→Elements→Auto Numbered-Thru Nodes

- 2) 复制已有单元

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Copy→Elements→Auto Numbered

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Copy→Elements→User Numbered

- 3) 镜像已有单元

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Reflect→Elements→Auto Numbered

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Reflect→Elements→User Numbered

#### 4) 在已有表面上生成表面单元

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Creat→ Elements→Surf→Contact

#### 5) 在已有单元面上生成表面单元

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Creat→ Elements→Surf→Contact→Attch to Fluid-Area to Fluid

#### 6) 生成接触单元

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Creat→Elements→Surf→Contact→Surf to Surf

## 2.4 施加载荷

在建立好有限元网格模型后,就可以对模型施加载荷条件。对几何实体和有限元模型关联的情况,既可以直接在实体模型上施加载荷,也可以对有限元模型施加载荷。如果使用了“Detached Elems”操作后,就只能对有限元模型施加载荷。

### 2.4.1 载荷概述

有限元分析的目的是求解结构在具体载荷作用下的响应,因此添加载荷是有限分析中非常重要的一部分。它主要包括载荷概念和分类、施加载荷、设定载荷步选项等内容。

#### 1. 载荷概念和分类

ANSYS 软件中的载荷包含了所有的边界条件、外部或内部的作用效应。典型的分析类型及对应载荷形式参见表 2-1。

表 2-1 各种典型载荷

分 析 类 型	载 荷 形 式
结构分析	位移、力、弯矩、压力、温度、重力等
热分析	温度、对流、热流速率、无限表面等
磁场分析	磁势、磁通量、源流密度、无限表面等
电场分析	电势、电流、电荷、电荷密度、无限表面等
流场分析	速度、压力

一般可以将载荷分为以下 6 类。

- (1) DOF 约束 (DOF Constraint): 用于限定模型自由度的值, 如位移等。
- (2) 力 (Force): 施加于节点上的集中载荷, 如集中力、弯矩、热流率等。

(3) 表面载荷 (Surface Load): 施加在单元上的分布载荷, 如均布载荷、压力和热流量等。

(4) 体载荷 (Body Load): 作用在体积或场域内, 包括体积载荷和场载荷, 如温度、电流密度等。

(5) 惯性载荷 (Inertia Load): 由物体惯性引起的载荷, 如重力加速度等。

(6) 耦合场载荷 (Coupled-field Load): 一种特殊载荷, 是指从一种分析类型得到的结果用于另一种分析类型的载荷, 如将磁场分析中的磁力作为结构分析中的外力等。

## 2. 载荷步和载荷子步的概念

### 1) 载荷步

载荷步就是指分步施加的载荷, 仅仅是为了获得解答的载荷配置。例如, ANSYS 模拟实际试验的加载过程: 第一步施加剪力, 第二步施加轴力。在线性静态或稳态分析中, 可以使用不同的载荷步实现不同的载荷搭配。在瞬态分析中, 通过多个载荷步载荷历程曲线的不同区段来描述载荷随时间的变化情况。

### 2) 载荷子步

载荷子步是求解载荷步中的时间点, 是对载荷步描述的进一步细化。主要使用在以下 3 种情况:

- (1) 在非线性静态分析或稳态分析时, 使用载荷子步逐渐施加载荷以求得更精确的解。
- (2) 在线性或非线性瞬态分析时, 使用载荷子步满足瞬态时间积分法则。
- (3) 在谐波分析时, 使用载荷子步可以获得谐波频率范围内多个频率处的解。

ANSYS 使用时间作为施加载荷步的代表参数, 通过载荷步结束的时间来定义载荷步。时间在瞬态分析或其他有关速率的分析中具有实际意义, 而在对速率无关的分析中, 时间只是识别载荷步与载荷子步的计数器。在默认的情况下, ANSYS 赋给第一个载荷步时间值  $TIME=1$ ; 第二个载荷步结束的时间值,  $TIME=2$ ; 依此类推。载荷子步则按线性插值。

## 3. 阶跃载荷和坡道载荷

在一个载荷步中指定载荷子步时, 需要说明是阶跃载荷还是坡道载荷。

### 1) 阶跃载荷

全部载荷施加于第一个载荷子步, 且后继载荷子步中载荷保持不变。

### 2) 坡道载荷

在每个载荷子步中, 载荷是逐渐递增的, 全部载荷出现在载荷步结束时。

ANSYS 中设定载荷是阶跃载荷还是坡道载荷的命令为 KBC。其中, KBC,0 表示坡道载荷; KBC,1 表示阶跃载荷。

## 4. 自由度约束条件的施加

DOF 即自由度, 是指模型所具有的独立运动的数目。ANSYS 中允许用户在节点、关键点、线、面上的 DOF 约束条件。

### 1) 在节点上施加 DOF 约束条件

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes

Main Menu→Solution→Loads→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes

对应的命令: D

执行该命令后, 会弹出一个节点拾取对话框, 拾取对象节点后, 会弹出 “Apply U,ROT on Nodes” 对话框, 如图 2-63 所示。其中, “Lab2 DOFS to be constrained” 选项为自由度种类, 选中需要约束的自由方向后, 在 “VALUE Displacement value” 选项的输入栏中输入约束值, 单击 “OK” 按钮, 即可完成节点上 DOF 约束条件的施加。

### 2) 在关键点上施加 DOF 约束条件

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Keypoints

Main Menu→Solution→Loads→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Keypoints

对应的命令: DK

执行该命令后, 会弹出一个关键点拾取对话框, 拾取对象关键点后, 会弹出 “Apply U,ROT on KPs” 对话框, 如图 2-64 所示。其中, “Lab2 DOFs to be constrained” 选项为自由度种类, 选中需要约束的自由方向后, 在 “VALUE Displacement value” 选项的输入栏中输入约束值, 单击 “OK” 按钮, 即可完成关键点上 DOF 约束条件的施加。

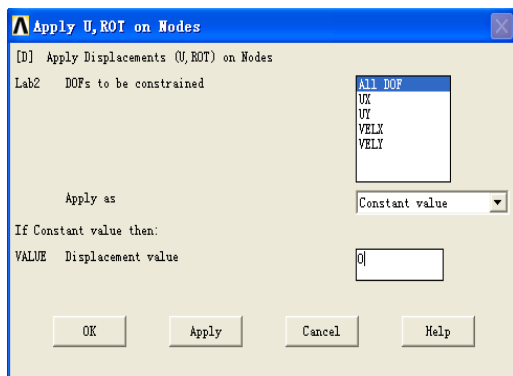


图 2-63 “Apply U,ROT on Nodes” 对话框

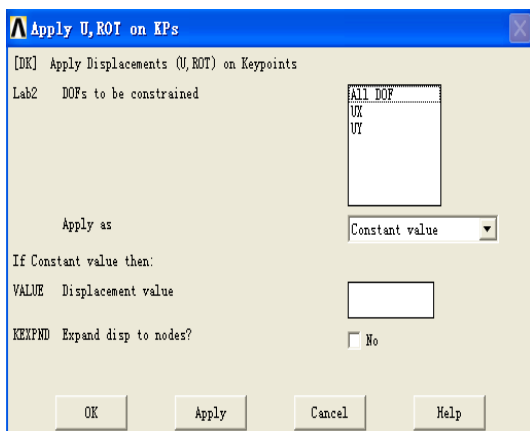


图 2-64 “Apply U,ROT on KPs” 对话框

### 3) 在线上施加 DOF 约束条件

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Lines

Main Menu→Solution→Loads→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Lines

对应的命令: DL

执行该命令后, 会弹出一个线拾取对话框, 拾取对象线后, 会弹出 “Apply U,ROT on Lines” 对话框, 如图 2-65 所示。其中, “Lab2 DOFs to be constrained” 选项为自由度种类, 选中需要约束的自由方向后, 在 “VALUE Displacement value” 选项的输入栏中输入约束值,

单击“OK”按钮，即可完成线上 DOF 约束条件的施加。

#### 4) 在面上施加 DOF 约束条件

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Areas

Main Menu→Solution→Loads→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Areas

对应的命令: DA

执行该命令后，会弹出一个面拾取对话框，拾取对象面后，会弹出“Apply U,ROT on Areas”对话框，如图 2-66 所示。其中，“Lab2 DOFs to be constrained”为自由度种类，选中需要约束的自由方向后，在“VALUE Displacement value”选项的输入栏中输入约束值，单击“OK”按钮，即可完成面上 DOF 约束条件的施加。

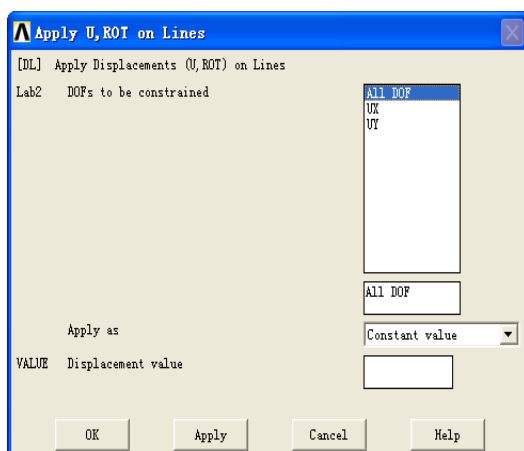


图 2-65 “Apply U,ROT on Lines”对话框

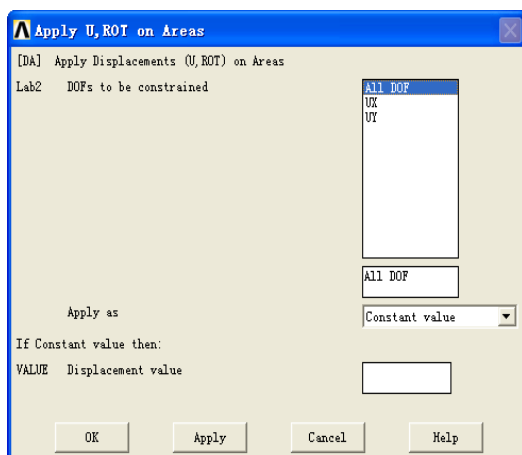


图 2-66 “Apply U,ROT on Areas”对话框

### 5. 施加对称/反对称边界条件

对称边界条件是指不能发生对称面外的移动和对称面内的旋转。反对称边界条件是指不能发生对称面内的移动和对称面外的旋转。

#### 1) 对称边界条件

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Loads→Defind Loads→Apply→Structural→Displacement→Symmetry B.C.→On Nodes

对应的命令: DSYM,SYMM,Normalormal,KCN

#### 2) 反对称边界条件

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Loads→Defind Loads→Apply→Structural→Displacement→Antisymm B.C.→On Nodes

对应的命令: DSYM,ASYM,Normalormal,KCN

## 6. 删除 DOF 约束条件

以删除节点上的 DOF 约束条件为例，其余均可参照此完成删除相应 DOF 约束条件。

GUI 操作路径：

Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Delete→Structural→Displacement→On Nodes

Main Menu→Solution→Loads→Define Loads→Delete→Structural→Displacement→On Nodes

对应的命令：DDELE

同理，删除关键点、线和面上的 DOF 约束条件的对应命令依次为 DKDELE、DLDELE 和 DADELE。

## 2.4.2 施加载荷

本节主要简单介绍集中力、表面力、体积力和耦合场力施加载荷的方式。

### 1. 集中力载荷

#### 1) 施加集中力载荷

集中力载荷只能施加在节点和关键点上。

GUI 操作路径：

Main Menu→Preprocessor→Loads→Defind Loads→Apply→Structural→Force→Moment→On Nodes

或 Main Menu→Solution→Loads→Defind Loads→Apply→Structural→Force→Moment→On Nodes

Main Menu→Preprocessor→Loads→Defind Loads→Apply→Structural→Force→Moment→On Keypoints

或 Main Menu→Solution→Loads→Defind Loads→Apply→Structural→Force→Moment→On Keypoints

对应的命令：分别为 FK 和 F

执行以上操作后，选中需要施加集中力载荷的节点或关键点对象，弹出节点或关键点集中力载荷参数设置对话框分别如图 2-67 和图 2-68 所示。其中，“Lab Direction of force/mom”选项为自由度方向，集中力载荷大小在“VALUE Force/moment value”选项的输入栏中设置，最后单击“OK”按钮即可。

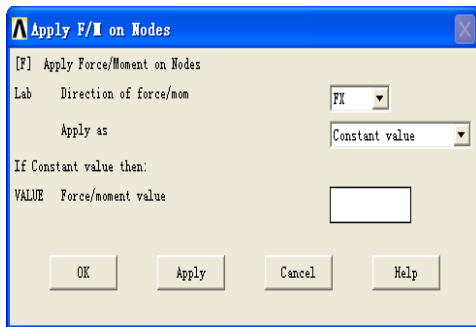


图 2-67 “Apply F/M on Nodes”对话框

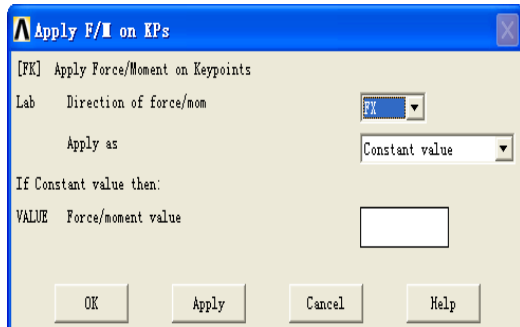


图 2-68 “Apply F/M on KPs”对话框



## 2) 删除集中力载荷

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Loads→Defind Loads→Delete→Structural→Force→Moment→On Nodes  
或 Main Menu→Solution→Loads→Defind Loads→Delete →Structural→Force→Moment→On Nodes

Main Menu→Preprocessor→Loads→Defind Loads→Delete →Structural→Force→Moment→On Keypoints  
或 Main Menu→Solution→Loads→Defind Loads→Delete →Structural→Force→Moment→On Keypoints  
对应的命令: 分别为 FDELE 和 FKDELE

执行以上操作后, 选中需要删除集中力载荷的节点或关键点对象, 弹出节点或关键点的删除集中力载荷参数设置对话框分别如图 2-69 和图 2-70 所示。在“Lab Force/moment to be deleted”选项的下拉列表中选择需要删除载荷的对象, 单击“OK”按钮即可。

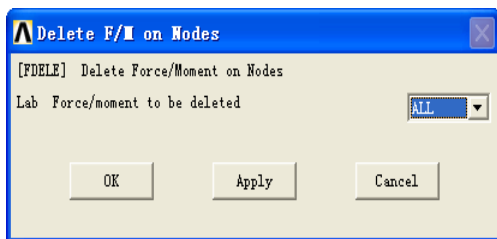


图 2-69 “Delete F/M on Nodes”对话框

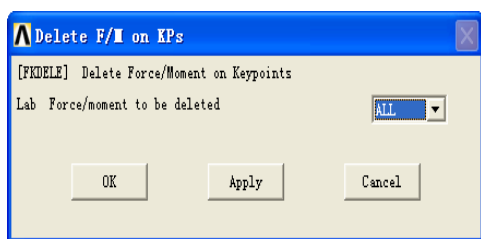


图 2-70 “Delete F/M on KPs”对话框

## 3) 集中力载荷施加方式

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Loads→Defind Loads→Setting→Replace vs Add→Forces

Main Menu→Solution→Loads→Defind Loads→Setting→Replace vs Add→Forces

对应的命令: FCUM

执行该命令后, 将弹出“Replace/Add Setting for Forces”对话框, 如图 2-71 所示。其中, “[DOFSEL] Forces to be affected”选项设置为集中力对象, “Oper New force values will”选项的下拉列表可以选择替代 (Replace existing) 或添加至 (Add to existing) 已有集中力载荷上。

## 4) 按比例缩放集中力载荷

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Loads→Defind Loads→Operate→Scale FE Loads→Forces

Main Menu→Solution→Loads→Defind Loads→Operate→Scale FE Loads→Forces

对应的命令: FSCALE

执行该命令后, 将弹出“Scale Forces”对话框, 如图 2-72 所示。其中, “[DOFSEL] Forces to be scaled”选项设置为集中力对象, 在“RFACT Scale factor”选项的输入栏中输入相应参数, 单击“OK”按钮即可。

## 2. 表面力载荷

### 1) 施加表面力载荷

表面力载荷可以施加在节点组、线和面上。

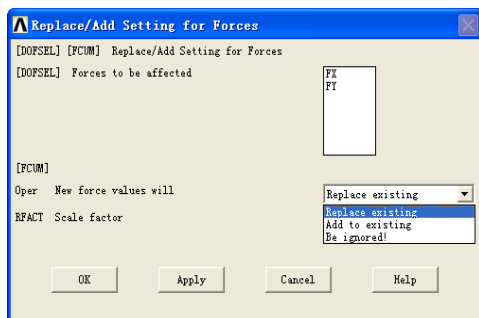


图 2-71 “Replace/Add Setting for Forces” 对话框

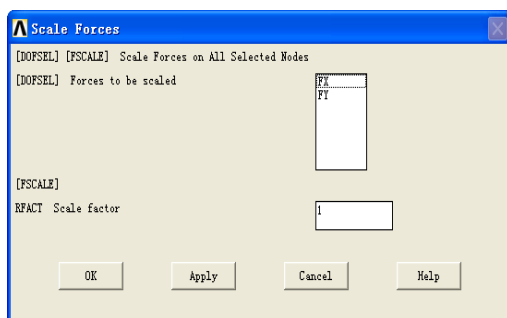


图 2-72 “Scale Forces” 对话框

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Loads→Defind Loads→Apply→Structural→Pressure→On Nodes  
 或 Main Menu→Solution→Loads→Defind Loads→Apply→Structural→Pressure →On Nodes  
 Main Menu→Preprocessor→Loads→Defind Loads→Apply→Structural→Pressure→On Lines  
 或 Main Menu→Solution→Loads→Defind Loads→Apply→Structural→Pressure →On Lines  
 Main Menu→Preprocessor→Loads→Defind Loads→Apply→Structural→Pressure→On Areas  
 或 Main Menu→Solution→Loads→Defind Loads→Apply→Structural→Pressure →On Areas  
 对应的命令: 分别为 SF、SFL 和 SFA

执行以上操作后, 先选中需要施加表面力的节点组、线或面对象, 弹出节点组、线或面表面力载荷参数设置的对话框分别如图 2-73 至图 2-75 所示。在“VALUE Load PRES value”选项的输入栏中设置表面力载荷大小, 然后单击“OK”按钮即可。

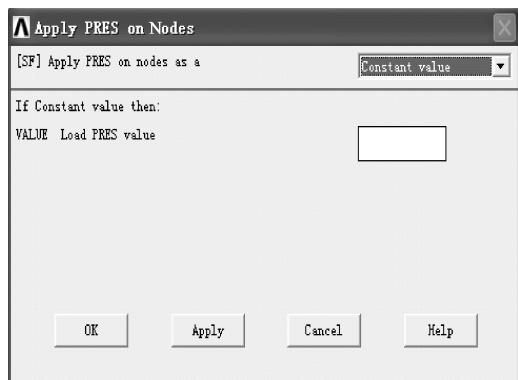


图 2-73 “Apply PRES on Nodes” 对话框

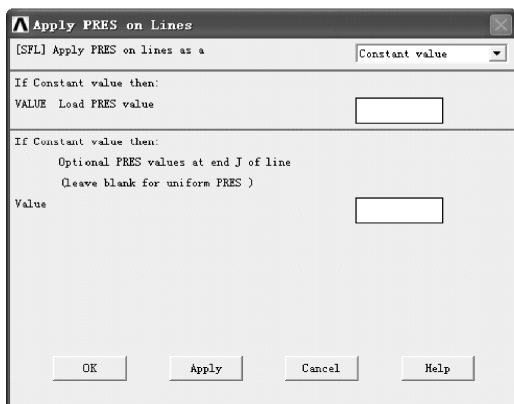


图 2-74 “Apply PRES on Lines” 对话框

## 2) 删除表面力载荷

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Loads→Defind Loads→Delete→Structural→Force→Moment→On Nodes  
 或 Main Menu→Solution→Loads→Defind Loads→Delete →Structural→Force→Moment→On Nodes  
 Main Menu→Preprocessor→Loads→Defind Loads→Delete →Structural→Force→Moment→On Lines  
 或 Main Menu→Solution→Loads→Defind Loads→Delete→Structural→Force→Moment→On Lines  
 Main Menu→Preprocessor→Loads→Defind Loads→Delete →Structural→Force→Moment→On Areas

或 Main Menu→Solution→Loads→Defind Loads→Delete→Structural→Force→Moment→On Areas  
对应的命令：分别为 SFDELE、SFLDELE 和 SFADELE

执行以上操作后，选中需要删除集中力的节点组、线或面对象，然后单击“OK”按钮即可。

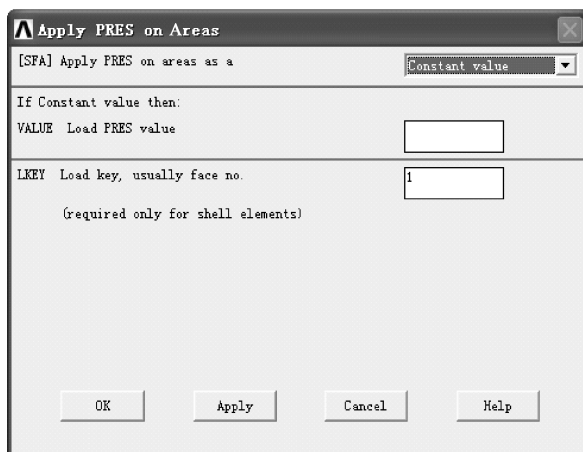


图 2-75 “Apply PRES on Areas”对话框

### 3) 指定表面力载荷梯度

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Loads→Defind Loads→Setting→For Surface Ld→Gradient

Main Menu→Solution→Loads→Defind Loads→Setting→ For Surface Ld→Gradient

对应的命令：SFGRAD

执行该命令后，将弹出“Gradient Specification for Surface Loads”对话框，如图 2-76 所示。其中，“Lab Type of surface load”选项的下拉列表中设置为表面力对象，“SLOPE Slope value (load/length)”选项的输入栏中输入梯度大小，“Sldir Slope direction”选项的下拉列表中选择梯度方向，“SLZER Location along Sldir-where slope contribution is zero”选项的输入栏中输入载荷为零，以及“SLKCN Slope coordinate system”选项的输入栏中输入参考的坐标系。

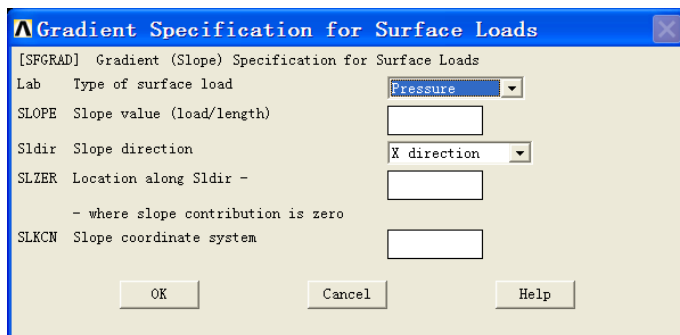


图 2-76 “Gradient Specification for Surface Loads”对话框

#### 4) 集中力载荷施加方式

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Loads→Defind Loads→Setting→Replace vs Add→Surface Loads

Main Menu→Solution→Loads→Defind Loads→Setting→Replace vs Add→Surface Loads

对应的命令: SFCUM

执行该命令后, 将弹出“Replace/Add Setting for Surface Loads”对话框, 如图 2-77 所示。其中, “Oper New load values will”选项的下拉列表可以选择替代 (Replace existing) 或添加至 (Add to existing) 已有集中力载荷上, 设置好相应的参数后单击“OK”按钮即可。

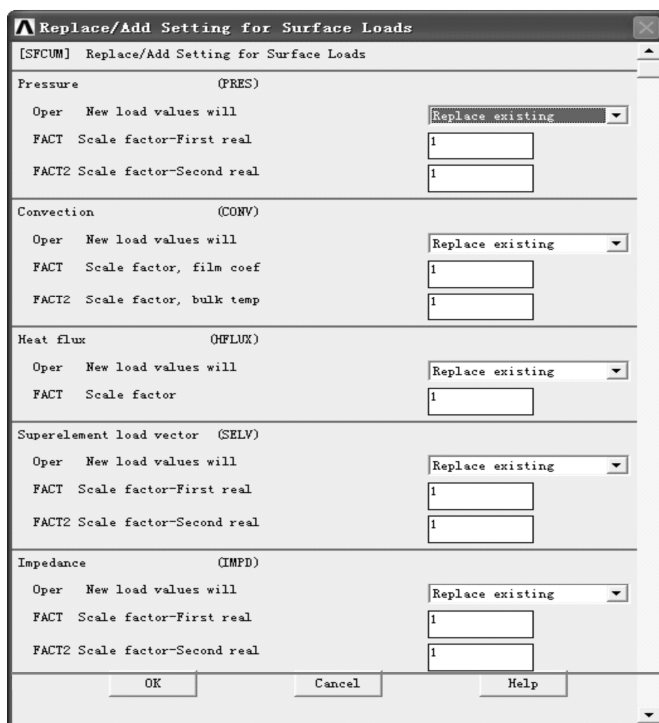


图 2-77 “Replace/Add Setting for Surface Loads”对话框

#### 5) 按比例缩放表面力载荷

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Loads→Defind Loads→Operate→Scale FE Loads→Surface Loads

Main Menu→Solution→Loads→Defind Loads→Operate→Scale FE Loads→ Surface Loads

对应的命令: SFSCALE

执行该命令后, 将弹出“Scale Surface Loads”对话框, 如图 2-78 所示。其中, “Lab Type of surface load”选项的下拉列表中为表面力类型, 在“FACT Scale factor”选项的输入栏中输入相应参数, 然后单击“OK”按钮即可。

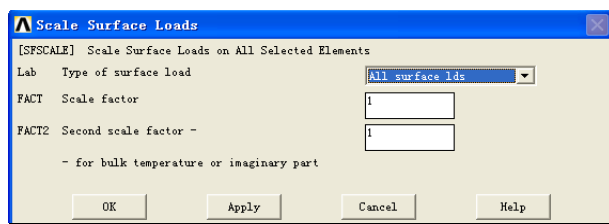


图 2-78 “Scale Surface Loads”对话框

### 3. 体积力载荷（以温度载荷为例）

#### 1) 施加体积力载荷

体积力载荷可以施加在节点、关键点、线、面和体上。

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Structural→Temperature→On Nodes  
 或 Main Menu→Solution→Loads→Define Loads→Apply→Structural→Temperature→On Nodes  
 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Structural→Temperature→On Keypoints  
 或 Main Menu→Solution→Loads→Define Loads→Apply→Structural→Temperature→On Keypoints  
 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Structural→Temperature→On Lines  
 或 Main Menu→Solution→Loads→Define Loads→Apply→Structural→Temperature→On Lines  
 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Structural→Temperature→On Areas  
 或 Main Menu→Solution→Loads→Define Loads→Apply→Structural→Temperature→On Areas  
 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Structural→Temperature→On Volumes  
 或 Main Menu→Solution→Loads→Define Loads→Apply→Structural→Temperature→On Volumes  
 对应的命令: 分别为 BF、BFK、BFL、BFA 和 BFV

执行以上操作后, 先选中需要施加体积力的节点、关键点、线、面或体对象, 弹出相应体积力载荷参数设置对话框, 如图 2-79 所示为对节点施加温度载荷体积力的“Apply TEMP on Nodes”对话框。其中, “[BF] Apply Structural Temperatures (TEMP) on Nodes Apply as”选项的下拉列表中设置体积力是常量或变量, 体积力载荷大小在“VAL1 Temperature value”选项的输入栏中设置, 然后单击“OK”按钮即可。

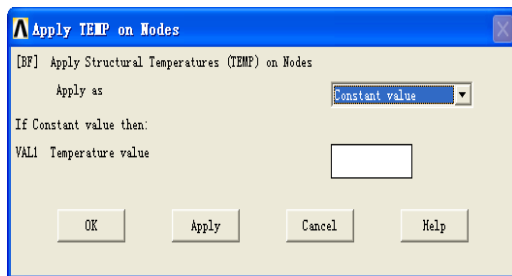


图 2-79 “Apply TEMP on Nodes”对话框

#### 2) 删除体积力载荷

删除节点、关键点、线、面和体上的体积力载荷。

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Loads→Defind Loads→Delete→Structural→Temperature

Main Menu→Solution→Loads→Defind Loads→Delete→Structural→Temperature

对应的命令: 分别为 BFDELE、BFKDELE、BFLDELE、BFADELE 和 BFVDELE

执行以上操作, 根据删除体积载荷的实体对象在下拉列表中选中相应的菜单选项后, 再选中相应的实体对象, 单击“OK”按钮即可。

### 3) 体积力载荷施加方式

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Loads→Defind Loads→Setting→Replace vs Add→Nodal Body Ld

Main Menu→Solution→Loads→Defind Loads→Setting→Replace vs Add→Nodal Body Ld

对应的命令: BFCUM

执行该命令后, 将弹出“Replace/Add Setting for Nodal Body Loads”对话框, 如图 2-80 所示。其中, “Oper New load values will”选项的下拉列表中可以选替代 (Replace existing) 或添加至 (Add to existing) 已有体积力载荷上, 设置好相应的参数后单击“OK”按钮即可。

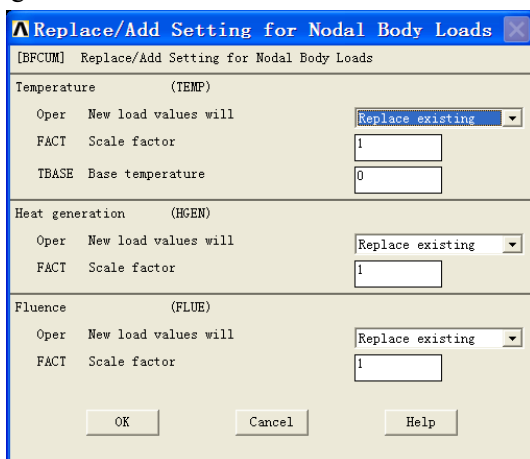


图 2-80 “Replace/Add Setting for Nodal Body Loads”对话框

### 4) 按比例缩放体积力载荷

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Loads→Defind Loads→Operate→Scale FE Loads→ Nodal Body Ld

Main Menu→Solution→Loads→Defind Loads→Operate→Scale FE Loads→ Nodal Body Ld

对应的命令: BFSCALE

执行该命令后, 将弹出“Scale Nodal Body Loads”对话框, 如图 2-81 所示。其中, “Lab Type of body load”选项的下拉列表中设置为体积力类型, 在“FACT Scale factor”选项的输入栏中输入相应参数, 然后单击“OK”按钮即可。

## 4. 耦合场力载荷

耦合场力载荷, 通常使用于耦合场分析中, 即将模型在一种类型的分析中得到的结果数据作为另一类分析中的载荷进行分析。

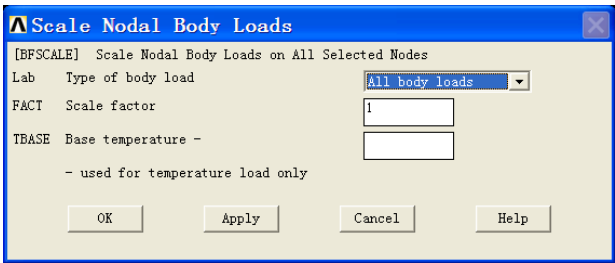


图 2-81 “Scale Nodal Body Loads” 对话框

GUI 操作路径：  
Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→(Load type)→(From Source)  
对应的命令：LDREAD

### 2.4.3 设定载荷步选项

载荷步选项用于控制如何使用载荷，随载荷步的不同而各有差别，主要包括通用选项、非线性选项、输出选项等。

GUI 操作路径：  
Main Menu→Solution→Analysis Type→Sol'n Controls

弹出 “Solution Controls” 对话框，如图 2-82 所示。

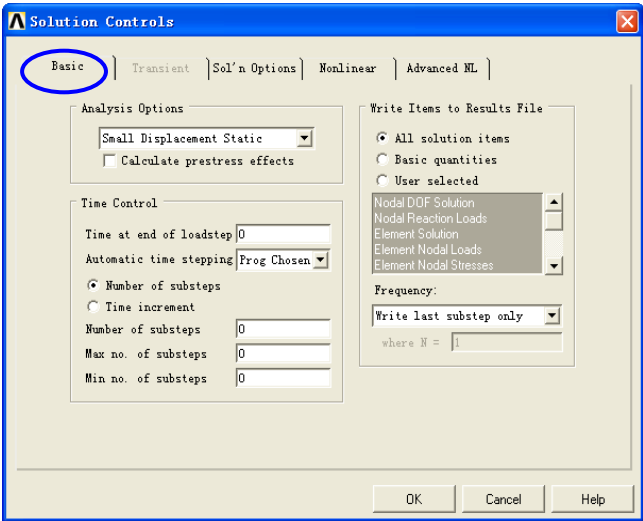


图 2-82 “Solution Controls” 对话框

#### 1. 通用选项

(1) 通用选项包括时间、子步数、载荷是阶跃载荷或坡道载荷等。如图 2-82 所示的 “Basic” 选项卡（默认打开），在 “Time at end of loadstep” 选项的输入栏中设置时间值；在 “Number

of substeps”选项的输入栏中指定载荷子步数，也可选择自动时间步长，由程序自动指定每个子步结束时的最优时间步。此外，在“Analysis Options”选项的下拉列表中选择分析的类型，包括：

- ① Small Displacement Static（小位移静态分析）；
- ② Large Displacement Static（大位移静态分析）；
- ③ Small Displacement Transient（小位移瞬态分析）；
- ④ Large Displacement Transient（大位移瞬态分析）。

（2）如图 2-82 所示，“Write Items to Results File”选项组用于控制分析输出结果的内容，包括：

- ① All solution items（所有结果项）；
- ② Basic quantities（基本结果项）；
- ③ User selected（用户自定义输出结果项），在其下拉列表中选择输出节点解、单元解等项。

（3）对于输出结果的频率——“Frequency”选项的下拉列表，包括：

- ① Write every substep（将每一子步的结果写入结果文件）；
- ② Do not write any substeps（不将结果写入结果文件）；
- ③ Write last substep only（将最后一个子步的结果写入结果文件）；
- ④ Write every Nth substep（每隔 N 个子步，将子步的结果写入结果文件）；
- ⑤ Write N number of substeps（将 N 个子步的结果写入结果文件）。

## 2. 非线性选项

非线性选项包括子步的最大平衡迭代次数、收敛公差和终止分析的准则等，用于非线性分析。打开“Nonlinear”选项卡，如图 2-83 所示。

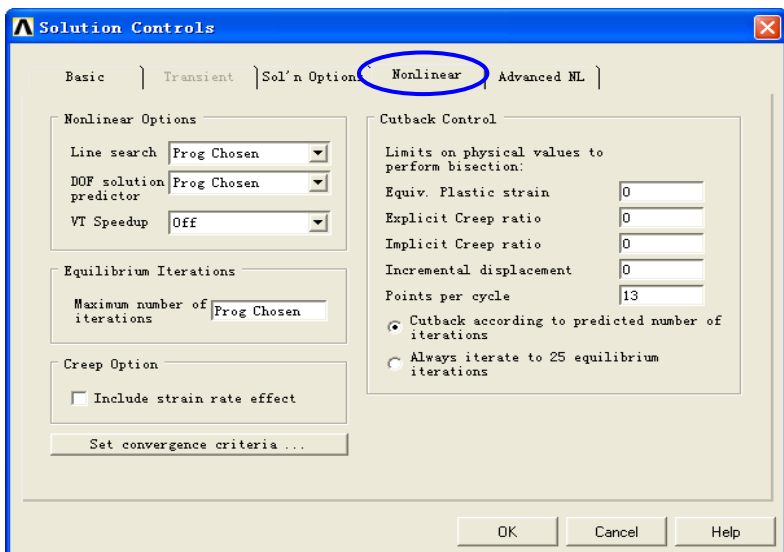


图 2-83 “Nonlinear”选项卡



### 1) 最大平衡迭代次数

由图 2-83 可知, “Maximum number of iterations” 选项的输入栏中输入最大平衡迭代次数, 也可选择自动设置。

### 2) 收敛公差

在图 2-83 中, 单击 “Set convergence criteria” 按钮, 弹出 “Default Nonlinear Convergence Criteria” 对话框, 如图 2-84 所示。ANSYS 已经自动默认了一个收敛公差, 用户自定义时, 只需要单击 “Replace” 按钮, 即可弹出 “Nonlinear Convergence Criteria” 对话框, 如图 2-85 所示。

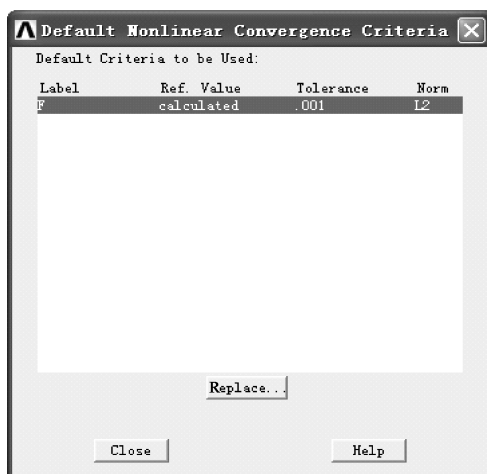


图 2-84 “Default Nonlinear Convergence Criteria” 对话框

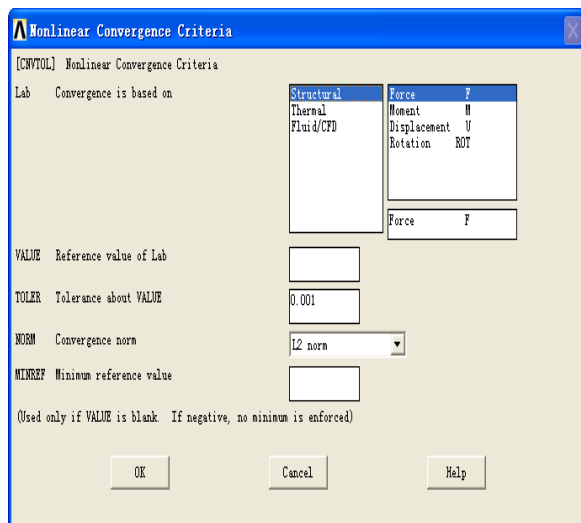


图 2-85 “Nonlinear Convergence Criteria” 对话框

对于结构非线性分析, 一般以力和力矩作为设置收敛准则的控制条件, 而位移只作为辅助条件。收敛公差默认值为 0.001, 可以根据实际分析要求放松或严格收敛准则。对于单自

由度结构，ANSYS 以不平衡力的平方和的平方根与  $\text{VALUE} \times \text{TOLER}$  的值进行比较来确定迭代是否收敛。其中，“VALUE Reference value of Lab”选项的默认值为所加载荷的平方和的平方根与“MINREF Minimum reference value”选项比较中的较大者。对于多自由度结构，须采用矢量的范数来进行收敛检查。ANSYS 提供了无限范数、1 范数和 2 范数三种类型。

### 3) 终止分析的准则

打开“Advanced NL”选项卡，如图 2-86 所示。

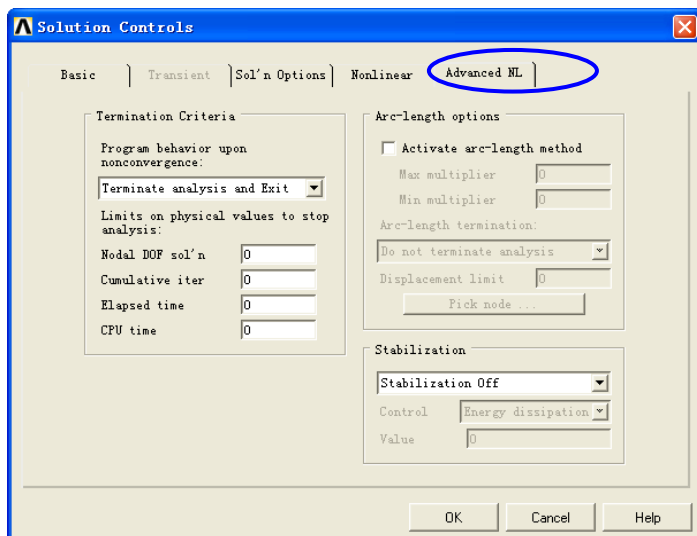


图 2-86 “Advanced NL”选项卡

在“Program behavior upon nonconvergence”选项的下拉列表中选择当迭代不收敛时，是否退出分析，包括：

- ① Do not terminate analysis（不终止分析）；
- ② Terminate analysis and Exit（终止分析并退出）；
- ③ Terminate but Do Not Exit（终止分析但不退出）。

“Limits on physical values to stop analysis”选项（控制分析是否退出的准则）包括：

- ① Nodal DOF sol'n（节点自由度解）；
- ② Cumulative iter（总迭代数）；
- ③ Elapsed time（时间限制）；
- ④ CPU time（CPU 时间限制）。

## 2.5 求解

建立好有限元分析模型，就可直接进入求解器进行加载工况和边界条件，以及求解策略等详细设置，然后进行有限元求解，这里主要介绍求解器的选择，设置多步载荷，以及求解过程中可能遇到的一些问题。

## 2.5.1 求解器

ANSYS 求解由有限元方法建立方程，求解结果包括：节点自由度值（构成原始结果与基本解）和派生值（构成了单元的结果，单元解通常是在单元积分点处计算出来的）。

ANSYS 联立方程求解的方法主要包括波前法、稀疏矩阵直接解法、Jacobi 共轭梯度法（JCG）、不完全 Cholesky 共轭梯度法（ICCG）和预条件共轭梯度法（PCG），默认为波前法。求解器的选择标准参见表 2-2。

表 2-2 求解器选择标准

解 法	典型应用场合	模 型 尺 寸	内 存 使 用	硬 盘 使 用
波前法	要求稳定性（非线性分析）或内存受限时	低于 50 000 个自由度	低	高
稀疏矩阵直接解法	要求稳定性和求解速度（非线性分析），尤其对病态矩阵（如形状不好的单元）	自由度为 10 000~500 000	中	高
Jacobi 共轭梯度法（JCG）	特别适合单场领域（如热、磁、声，以及多物理问题）中求解速度很重要	自由度为 50 000~1 000 000	中	低
不完全 Cholesky 共轭梯度法（ICCG）	在多物理模型应用中求解速度很重要时，处理其他迭代法很难收敛的模型（几乎为无穷矩阵）	自由度为 50 000~1 000 000	高	低
预条件共轭梯度法（PCG）	求解速度很重要时（大型模型的线性分析），尤其适用于实体单元的大型模型	自由度为 50 000~1 000 000	高	低

### 1. 波前法

波前法是一种直接求解法，它不组集总体的刚度矩阵，该方法通过三角化消去所有可以由其他自由度表达的自由度，形成最终三角矩阵。求解器在三角化过程中保留的节点自由度数称为波前，在所有自由度被处理后波前为 0，整个过程中波前的最大值称为最大波前，最大波前越大所需内存越大。整个过程中波前的均方值称为 RMS 波前，RMS 波前越大，求解时间越长。

对应的命令：EQSLV, FRONT

### 2. 稀疏矩阵直接解法

稀疏矩阵直接求解法是一种以消元为基础的直接求解法，可以支持实矩阵与复矩阵、对称矩阵与非对称矩阵、拉格朗日乘子等。该方法支持各类分析，病态矩阵也不会造成求解的困难。稀疏矩阵求解器由于需要存储分解后的矩阵，因此对于内存要求较高。

对应的命令：EQSLV, SPAR

### 3. Jacobi 共轭梯度法 (JCG)

JCG 求解器只有在静态分析、全谐波分析和完全瞬态分析时才能使用,适用于处理 PCG 不能处理的病态比较严重的问题,如具有较大的稀疏矩阵的 3-D 标量场分析。

### 4. 不完全 Cholesky 共轭梯度法 (ICCG)

类似于 JCG 求解器,但它使用了更加高级的预条件求解器,所以在病态矩阵的求解上比 JCG 更好,但所用的内存也是 PCG 的 2 倍。同样,也只能用于静态分析、全谐波分析和完全瞬态分析中。

### 5. 预条件共轭梯度法 (PCG)

与 JCG 类似,但在结构实体单元中其求解速度是 JCG 的 4~10 倍,PCG 求解器主要具有以下特点。

(1) 由于不需要矩阵分析,所需内存比稀疏矩阵法少。

(2) 对于中等或大尺寸模型,只要迭代合理,PCG 比稀疏矩阵求解器快。

(3) 依赖于刚度矩阵,如矩阵为良性则求解速度好,反之效率较低,其单元长宽比最好在 10:1 以下。

(4) 所需内存较大,一般为 JCG 的 2 倍。

波前法和稀疏矩阵直接求解法属于直接求解法,其他求解法则属于间接地迭代求解方法。整个求解过程的具体设置可以通过求解器来实现。

GUI 操作路径:

Main Menu→Preprocessor→Loads→Analysis Type→Analysis Options

Main Menu→Solution→Analysis Type→Sol'n Control

Main Menu→Solution→Unabridged Menu→Analysis Type→Analysis Options

Main Menu→Solution→Analysis Type→Analysis Options

求解命令: SOLVE

GUI 操作路径:

Main Menu→Solution→Current LS

当发出该命令后,ANSYS 程序从数据库中获取模型和载荷信息,并计算结果。结果被写入结果文件 (Jobname.RST, Jobname.RTH, Jobname.RMG 或 Jobname.RFL), 以及数据库。

## 2.5.2 求解多步载荷

可以通过 3 种方式定义和求解多个载荷步: 多次求解法、数组参数法和载荷步文件法。

### 1. 多次求解法

这种方法是最直接的。它是在每步载荷步定义好后执行 SOLVE 命令。不足之处在于,在交互式使用时必须等到每一步求解结束后才能定下一步载荷步,典型的多次求解法命令流如下:

```
/SOLU                                !进入求解模块
...
! LOAD STEP 1                        !载荷步 1
D, ...                               !加约束
SF, ...                              !加载荷
...
SOLVE                                !求解载荷步 1
! LOAD STEP 2                        !载荷步 2
D, ...                               !加约束
SF, ...                              !加载荷
...
SOLVE                                !求解载荷步 2
...
```

## 2. 数组参数法

这种方法主要用于瞬态和非线性静态（稳态）分析，需要学习 APDL（ANSYS 参数化设计语言），了解有关数组参数和 DO 循环的知识，这里就不作详细介绍了。

## 3. 载荷步文件法

载荷步是由载荷和载荷步选项构成。该方法是事先将所有要计算的每一步载荷步写入一个载荷步中（通过 LSWRITE 命令或者相应的 GUI 操作路径），然后使用一个命令即可读入每一个文件并求解。存储载荷步信息的文件即为载荷步文件。

### 1) 创建载荷步文件

GUI 操作路径：

Main Menu→Preprocessor→Loads→Load Step Opts→Write Ls File  
或 Main Menu→Solution→Loads→Load Step Opts→Write Ls File

载荷步文件按顺序以 Jobname.S01、Jobname.S02 和 Jobname.S03 等命名。

### 2) 读出载荷步文件

GUI 操作路径：

Main Menu→Preprocessor→Loads→Load Step Opts→Read Ls File  
或 Main Menu→Solution→Loads→Load Step Opts→Read Ls File

### 3) 删除载荷步文件

GUI 操作路径：

Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Operate→Delete Ls File  
Main Menu→Solution→Loads→Define Loads→Operate→Delete Ls File

如果需要修改载荷步文件，可以在 ANSYS 中先使用 LSREAD 命令读取载荷步文件，完成所需要的修改后，再执行 LSWRITE 命令将旧文件覆盖即可。

求解多个载荷步采用命令：LSSOLVE

GUI 操作路径:

Main Menu→Solution→From LS Files

命令 LSSOLVE 是按照顺序读取载荷步文件, 并开始每一载荷步的求解。典型的载荷步文件的示例命令流如下:

/SOLU	!进入求解模块
...	
! LOAD STEP 1	!载荷步 1
D, ...	!加约束
SF, ...	!加载荷
...	
LSWRITE	!写入载荷步文件 Jobname.S01
! LOAD STEP 2	!载荷步 2
D, ...	!加约束
SF, ...	!加载荷
...	
LSWRITE	!写入载荷步文件 Jobname.S02
...	
LSSOLVE, 1, 2	!求解载荷步文件 1 和 2

### 2.5.3 求解注意事项

这里总结一下在求解过程中, 需要了解的一些注意事项或者良好习惯。

#### 1. 选择正确的求解器

对大规模问题, 如果计算机内存够大, 建议采用 PCG 法。对于工程问题, 可将 ANSYS 默认的求解精度从  $1e-8$  改为  $1e-4$  或  $1e-5$  即可。

#### 2. 预测求解时间

对于模型比较复杂或者大规模的 ANSYS 分析, 建议在开始求解前了解分析所需要的求解时间, ANSYS 程序可在 RUNSTAT 模块中进行估算。

GUI 操作路径:

Main Menu→Run-Time Stats→Individual Stats

命令: RTIMST

#### 3. 估算文件的大小

要估计几个文件的大小: Jobname.ESAV, Jobname.EMAT, Jobname.EROT, Jobname.TRI, Jobname.FULL, Jobname.RST, Jobname.RTH, Jobname.RMG, Jobname.RFL。

GUI 操作路径:

Main Menu→Run-Time Stats→Individual Stats

命令: RFILSZ

#### 4. 估算内存需求

需要估计求解所需要的内存。

GUI 操作路径:

Main Menu→Run-Time Stats→Individual Stats

命令: RWFRNT

#### 5. 打开隐藏命令

在求解器中, 有些命令是默认的, 有一些命令是隐藏的。例如:

GUI 操作路径:

Main Menu→Solution→Analysis Type→Analysis Options

或 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time→Frequency→Time-Time Step

或 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time→Frequency→Time and Substeps

要想打开隐藏命令或菜单

GUI 操作路径:

Main Menu→Solution→Unabridged Menu

此时 Unabridged Menu 变成 Abridged Menu, 要想打开隐藏部分命令或菜单,

GUI 操作路径:

Main Menu→Solution→Abridged Menu

## 2.6 后处理

一旦完成计算, 就可以通过 ANSYS 后处理器查看分析结果, 包括位移、应力、应变、反力等。

### 2.6.1 后处理概述

后处理是指检查有限元求解完成后分析结果, 这是分析中最重要的一个环节之一。

检查分析结果可以使用两类后处理器: 通用后处理器 (POST1) 和时间历程后处理器 (POST26)。

### 2.6.2 通用后处理器

POST1 为通用后处理器, 可用于查看整个模型或选定的部分模型在某一子步 (时间步) 的结果。查看的结果主要由位移、应力、应变及反力等。在通用后处理器还可以获得等值线显示、变形形状, 以及检查和解释分析的结果列表。

**注意：**① 用 POST1 一次仅可以读取一个子步，且该子步的数据结果已经写入 Jobname.rst。

② 用 POST1 考察结果，数据库中的模型必须与求解时的模型为同一模型。

③ 结果文件（Jobname.rst）必须存在且有效。

### 1. 进入 POST1 通用后处理

命令：/POST1

GUI 操作路径：

Main Menu→General Postproc。

### 2. 读取子步结果数据

可以依据载荷步和子步号或者时间来识别结果文件。

命令：SET

GUI 操作路径：

Main Menn→General Postproc→Read Results→Load step

**注意：**如果指定的时刻没有一个可用的结果，ANSYS 程序会按照线性插值来计算出该时刻对应的结果。在非线性的分析中，这种线性内插值通常将导致某些精度损失，如图 2-87 所示。因此，对于非线性分析，建议选取子载荷步时间点来进行后处理。

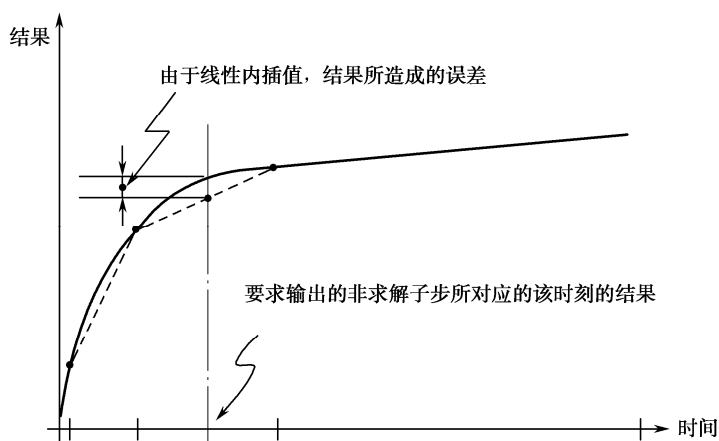


图 2-87 非线性结果的线性插值可能引起的误差

### 3. 显示变形结果

#### 1) 显示变形图

命令：PLDISP

GUI 操作路径：

Main Menu→General Postproc→Plot Results→Deformed Shapes

在大变形分析中，一般优先使用真实比例显示（IDSCALE, 1）。



## 2) 显示变形云图

命令: PLNSOL 或者 PLESOL

GUI 操作路径:

Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 或 Element Solu

## 3) 利用单元表格

命令: PLETAB, PLLS

GUI 操作路径:

Main Menu→General Postproc→Element Table→Plot Element Table

Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Line Elem Res

## 4) 列表显示

命令: PLETAB, PLLS

PRNSOL (节点结果)

PRESOL (单元结果)

PRRSOL (反力)

PRETAB

PRITER (子步迭代数)

NSORT

ESORT

GUI 操作路径:

Main Menu→General Postproc→List Results→Nodal Solution

或 Main Menu→General Postproc→List Results→Element Solution

Main Menu→General Postproc→List Results→Reaction Solution

## 2.6.3 时间历程后处理器

采用 POST26 时间历程后处理器可以观察整个时间历程的结果, 还可以比较一个 ANSYS 变量对另一个变量的关系。例如, 用图形表示某一节点处的位移与对应的所加载荷的关系, 或者列出某一节点处的塑性应变和对应的 Time 值之间的关系。常用的 POST26 后处理步骤如下所述。

### 1. 进入时间历程后处理器

命令: POST26

GUI 操作路径:

Main Menu→TimeHist Postpro

### 2. 定义变量

命令: NSOL (节点结果)

ESOL (单元结果)

RFORCL

GUI 操作路径:

Main Menu→Time Hist Postproc→Define Variables

### 3. 画曲线或者列表显示变量

命令: PLVAR (图形中的变量)

PRVAR

EXTREM (列表变量)

GUI 操作路径:

Main Menu→TimeHist Postprc→Graph Variables

Main Menu→TimeHist Postproc→List Variables

Main Menu→TimeHist Postproc→List Extremes

## 2.7 工程实例：简单台柱静力分析

本章主要介绍 ANSYS 分析的基本步骤,对于以上所有的命令解释和 GUI 操作路径,可能对读者来说比较抽象,难以理解真正的意思,因此,给出一个简单的例子,对本章的主要内容进行连贯地介绍。

### 2.7.1 问题描述

一工程用圆柱形金属支柱,高约为 25m,底面直径约为 3m,其底座固定在地基上,使用中主要受载来自于顶部结构的垂向压力为 1000N,侧向风载荷约为 100N。金属支柱材料弹性模量为 210GPa,泊松比为 0.3。试分析其使用过程中的变形和危险点。

### 2.7.2 问题分析

根据问题对象,可以用三维圆柱实体模型来进行有效的模拟,且结构变形应该不会允许超过一定的范围(在此变形范围内,结构整体依然是处于弹性阶段),因此可以进行简单的线弹性静力学分析,来获得结构的变形位移和应力结果。

**注意:** 尽管圆柱体结构是结构对称,但是其所有外载荷并不是对称的,因此,不能进行简化模拟分析。

### 2.7.3 求解步骤

#### 1. 建立工作文件名和工作标题

##### 1) 定义工作文件名

依次单击: Utility Menu→File→Change Jobname,弹出“Change Jobname”对话框,如图 2-88 所示,在“[FILNAM] Enter new jobname”选项的输入栏中输入工作文件名为“EX2-1”,勾选“New log and error files?”选项的“Yes”复选框,单击“OK”按钮关闭该对话框。

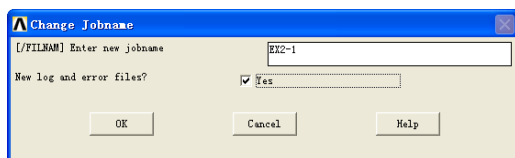


图 2-88 “Change Jobname”对话框

对应命令流:

```
/FILENAME, EX2-1,1
```

## 2) 定义工作标题

依次单击: Utility Menu→File→Change Title, 弹出“Change Title”对话框, 如图 2-89 所示, 在“[/TITLE] Enter new title”选项的输入栏中输入“The analysis of a cylinder body”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

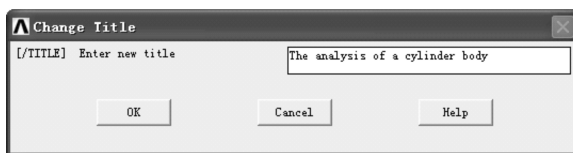


图 2-89 “Change Title”对话框

对应命令流:

```
/TITLE, The analysis of a cylinder body
```

## 2. 定义单元类型

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete, 弹出“Element Types”对话框, 如图 2-90 所示。单击“Add...”按钮, 弹出“Library of Element Types”对话框, 如图 2-91 所示。在“Library of Element Types”选项的左列表框中选择“Structural Mass→Solid”选项, 右列表框中选择“Brick 20node 95”选项; 在“Element Type reference number”选项的输入栏中输入“2”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

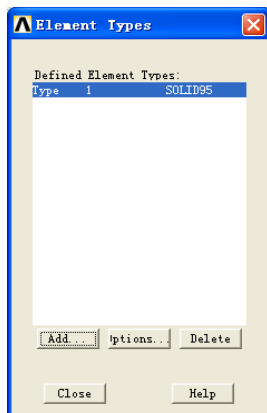


图 2-90 “Element Types”对话框

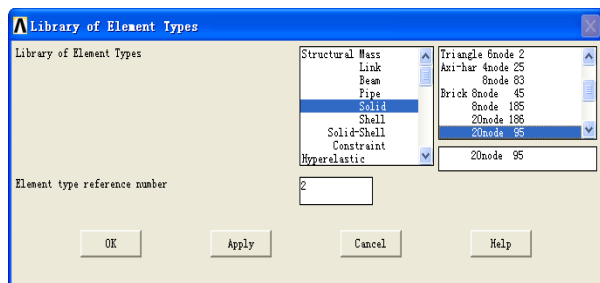


图 2-91 “Library of Element Types”对话框

对应命令流:

```
/PREP7
ET,1,SOLID95
```

### 3. 定义材料性能参数

#### 1) 定义材料

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Material Models, 弹出“Define Material Model Behavior”对话框。

#### 2) 定义材料属性

依次单击: Structural→Linear→Elastic→Isotropic, 弹出“Linear Isotropic Properties for Material Number 1”对话框, 在“EX”选项的输入栏中输入“2.1e11”, 在“PRXY”选项的输入栏中输入“0.3”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

#### 3) 退出材料属性设置

在“Define Material Model Behavior”对话框中选择“Material→Exit”, 或者直接单击右上角关闭按钮关闭该对话框, 退出材料属性设置。

对应命令流:

```
MP, EX, 1, 2.1e11
MP, PRXY, 1, 0.3
```

### 4. 生成几何模型、划分网格

#### 1) 建立圆柱体

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Cylinder→By Dimensions, 弹出“Create Cylinder by Dimensions”对话框, 如图 2-92 所示, 在“RAD1 Outer radius”选项的输入栏中输入“1.5”, 在“RAD2 Optional inner radius”选项的输入栏中输入“0”, 在“Z1, Z2 Z-coordinates”选项的输入栏中分别输入“0”和“25”, 以及“THETA1 Starting angle (degrees)”和“THETA2 Ending angle (degrees)”选项的输入栏中分别输入“0”和“360”。单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
CYLIND, 1.5, 0, 0, 25, 0, 360
```

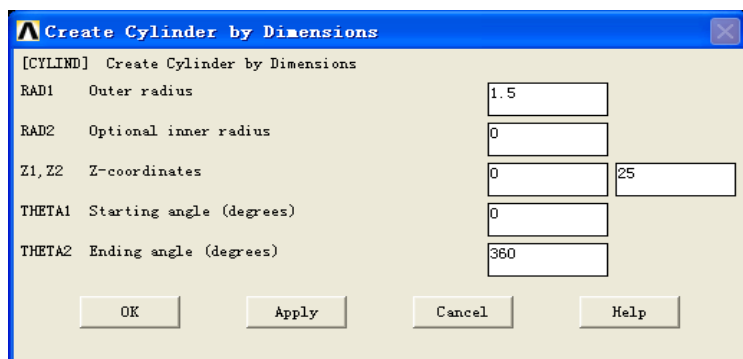


图 2-92 “Create Cylinder by Dimensions” 对话框

## 2) 划分体网格

首先设置网格信息，依次单击：Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→Default Attrs，弹出“Meshing Attributes”对话框，如图 2-93 所示。在“[TYPE] Element type number”选项的下拉列表中选择定义好的单元“1 SOLID95”，单击“OK”按钮关闭该对话框。然后依次单击：Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→SmartSize→Basic，弹出“Basic SmartSize Settings”对话框，如图 2-94 所示。在“LVL Size Level”选项的下拉列表中选择“3”，然后单击“OK”按钮关闭该对话框。

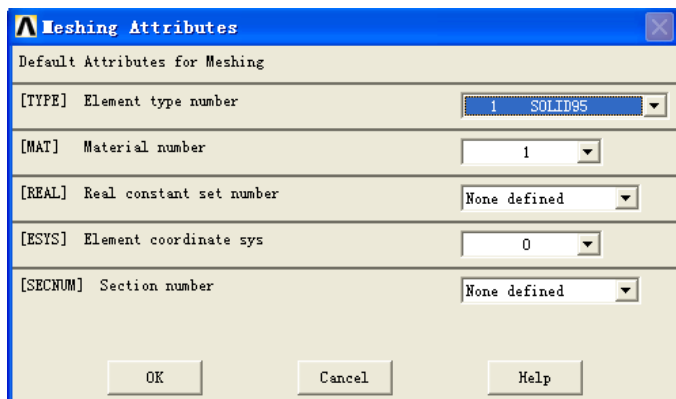


图 2-93 “Meshing Attributes” 对话框

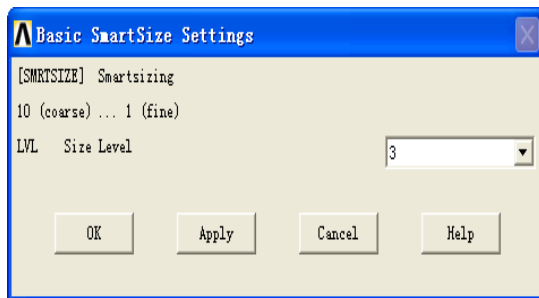


图 2-94 “Basic SmartSize Settings” 对话框

最后的开始网格划分，依次单击：Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Volume→Free，弹出“Mesh Volumes”拾取对话框，在空白输入栏中输入圆柱实体的编号“1”，单击“OK”按钮，生成有限元网格，如图 2-95 所示。

对应命令流：

```
MSHKEY, 0  
SMRTSIZE, 3  
MSHAPE, 1, 3d  
VMESH, 1
```

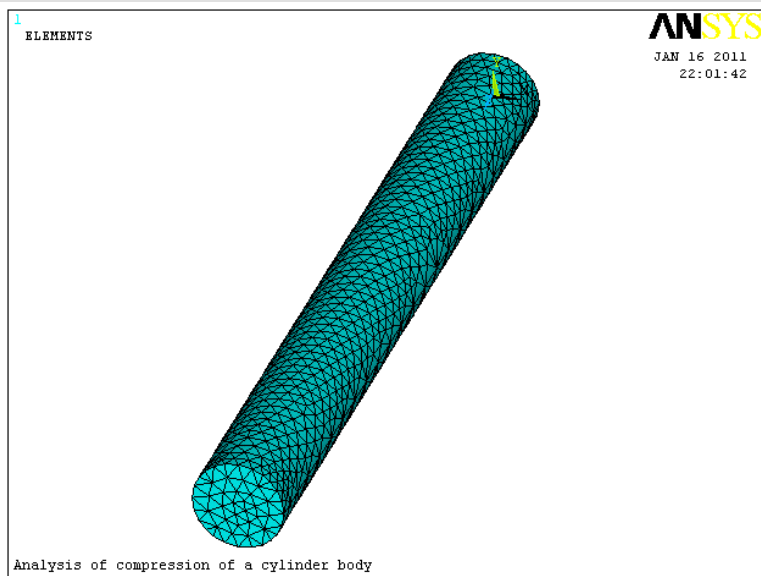


图 2-95 图形显示有限元网格

## 5. 加载与求解

### 1) 定义求解类型

依次单击：Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis，弹出“New Analysis”对话框，选择分析类型为“Static”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流：

```
/SOLU  
ANTYPE, 0
```

### 2) 施加位移边界条件

依次单击：Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Areas，弹出“Apply U,ROT on Areas”拾取对话框，如图 2-96 所示。在其输入栏中输入“1”（也可在图形窗口中用鼠标点取编号为“A1”的底面），单击“OK”按钮，弹出“Apply U,ROT on Areas”对话框，如图 2-97 所示。在“Lab2 DOFs to be constrained”选项中选择“ALL DOF”选项，单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

DA, 1, ALL

### 3) 施加载荷边界条件

依次单击: Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Pressure→ On Areas, 弹出“Apply PRES on Areas”拾取对话框, 如图 2-98 所示。在其输入栏中输入“2”(也可在图形窗口中用鼠标点取编号为“A2”的底面), 单击“OK”按钮, 弹出“Apply PRES on areas”对话框, 如图 2-99 所示。在 “[SFA] Apply PRES on areas as a” 选项的下拉列表中选择“Constant value”选项, 并在“VALUE Load PRES value”选项的输入栏中输入“-1000”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

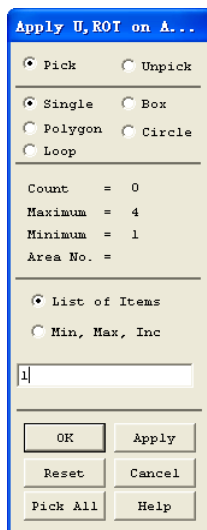


图 2-96 “Apply U, ROT on Areas”拾取对话框

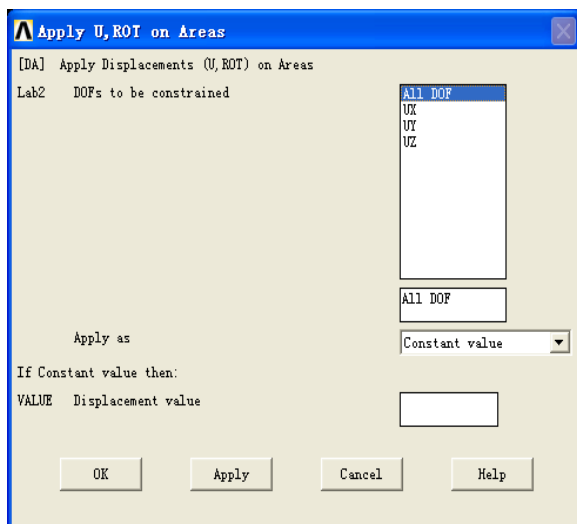


图 2-97 “Apply U, ROT on Areas”对话框

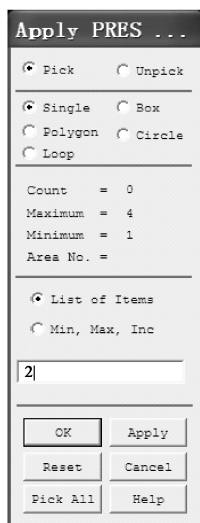


图 2-98 “Apply PRES on Areas”拾取对话框

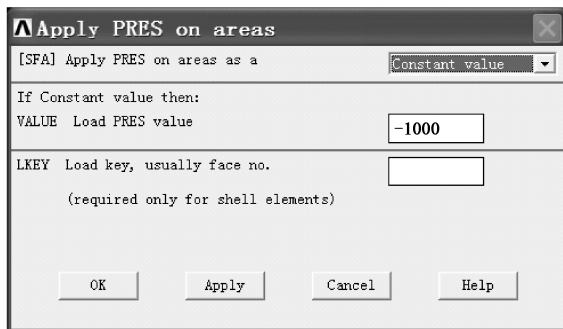


图 2-99 “Apply PRES on areas”对话框

对应命令流:

SFA, 2, 1, PRES, -1000

施加风载荷, 首先选择迎风面母线上节点, 依次单击: Utility Menu→Select→Entities, 弹出“Select Entities”拾取对话框, 如图 2-100 所示。在第一个下拉列表中选择“Nodes”选项; 在第二个下拉列表中选择“By Location”选项; 勾选“X coordinates”的复选框并在空白输入栏中输入“1.5”, 单击“Apply”按钮; 然后勾选“Y coordinates”的复选框并在空白输入栏中输入“0”, 再勾选“Reselect”的复选框后, 单击“OK”按钮关闭该拾取对话框。然后, 依次单击: Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Force/Moment→On Nodes, 弹出“Apply F/M on Nodes”拾取对话框, 如图 2-101 所示。单击“Pick All”按钮, 弹出“Apply F/M on Nodes”对话框, 如图 2-102 所示。在“Lab Direction of force/mom”选项的下拉列表中选择“FX”, 在“Apply as”选项的下拉列表中选择“Constant value”, 并在“VALUE Force/moment value”选项的输入栏中输入“-100”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

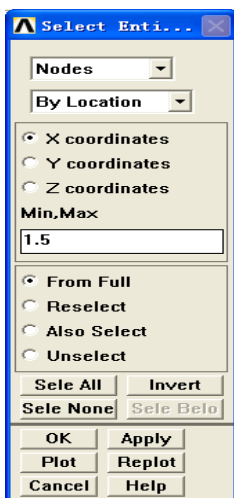


图 2-100 “Select Entities”拾取对话框

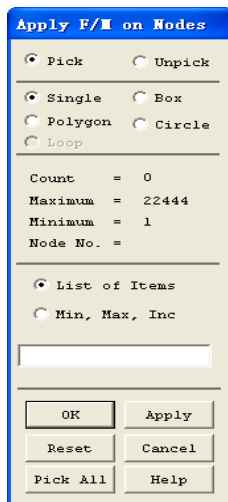


图 2-101 “Apply F/M on Nodes”拾取对话框

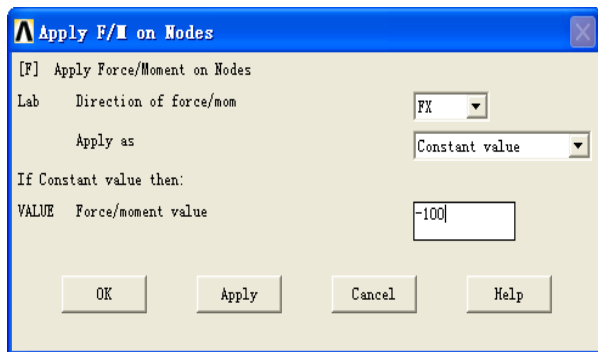


图 2-102 “Apply F/M on Nodes”对话框



对应命令流:

```
NSEL, S, LOC, X, 1.5  
NSEL, R, LOC, Y, 0  
F, ALL, FX, -100
```

#### 4) 求解

依次单击: Main Menu→Solution→Solve→Current LS, 弹出“/STATUS Command”文本框及“Solve Current Load Step”对话框, 浏览完毕文本框后单击“File→Close”按钮退出文本框。单击对话框上的“OK”按钮, ANSYS 开始求解计算, 求解完成后, 弹出“Note”对话框, 单击“Close”按钮关闭。

对应命令流:

```
ALLSEL  
SOLVE  
FINISH
```

### 6. 进入一般后处理模块, 查看结果

#### 1) 查看变形图

依次单击: Main Menu→General Postproc→Plot Results→Deformed Shape, 弹出“Plot Deformed Shape”对话框, 选择“Def + undeformed”选项, 单击“OK”按钮关闭该对话框。显示结构变形图, 保留未变形结构轮廓, 如图 2-103 所示。

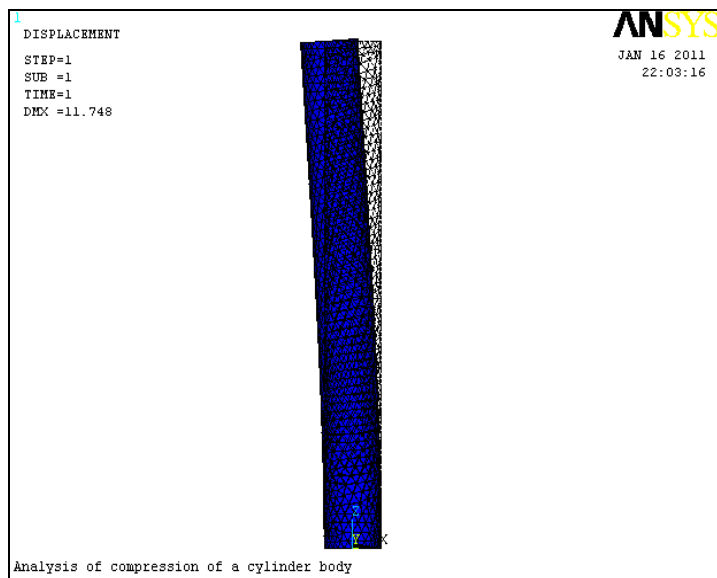


图 2-103 图形显示台柱结构变形

#### 2) 查看 X 方向位移

依次单击: Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu, 弹出“Contour Nodal Solution Data”对话框, 在“Item to be contoured”选项框中依次单击: Nodal

Solution→DOF Solution→x-Component of displacement, 单击“OK”按钮, 显示  $X$  方向位移图, 如图 2-104 所示。

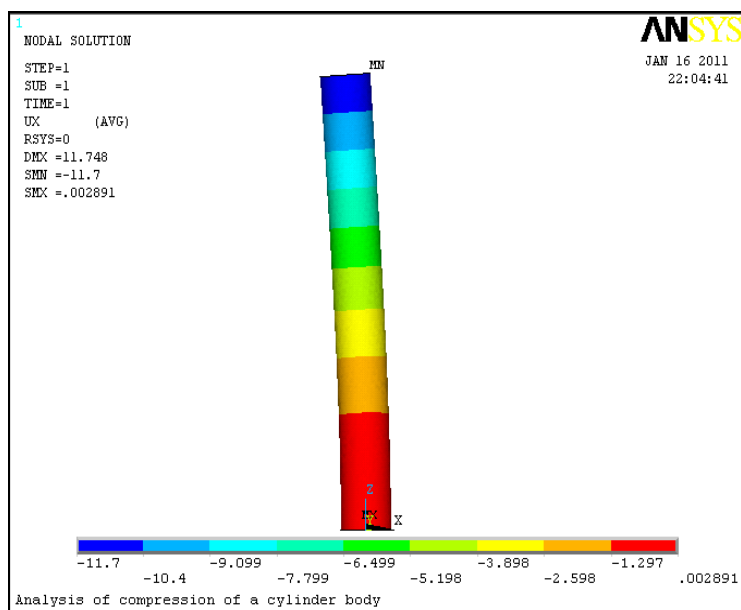


图 2-104 图形显示结构  $X$  方向位移

### 3) 显示结构等效应力云图

依次单击: Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu, 弹出“Contour Nodal Solution Data”对话框。依次单击: Nodal Solution→Stress→von Mises stress, 单击“OK”按钮, 显示结构等效应力云图, 如图 2-105 所示。

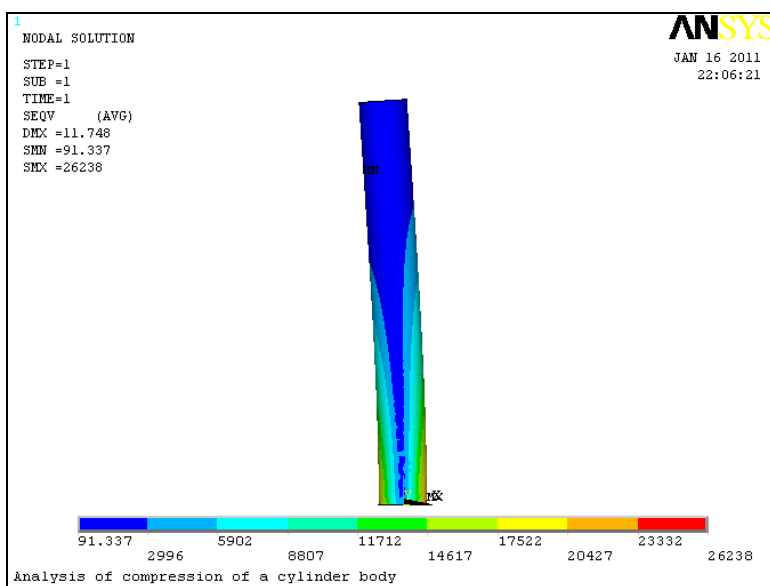


图 2-105 图形显示台柱结构等效应力云图

对应命令流:

```
POST1
PLDISP, 1
PLNSOL, U, X, 0, 1.0
PLNSOL, S, EQV, 0, 1.0
```

## 2.7.4 简单台柱静力分析完整命令流

```
FINISH
/CLEAR
! (1) 建立工作文件名和工作标题
/FILNAME, EX2-1, 1 !指定工作名
/TITLE, The analysis of a cylinder body !指定标题名
!进入一般前处理模块
/PREP7
! (2) 定义单元类型
ET, 1, SOLID95 !选择实体单元
! (3) 定义材料性能参数
MP, EX, 1, 2.1e11 !输入材料弹性模量
MP, PRXY, 1, 0.3 !输入材料泊松比
! (4) 生成几何模型、划分网格
CYLIND, 1.5, 0, 0, 25, 0, 360 !生成一个圆柱体
!划分单元网格
MSHKEY, 0 !选择自由网格划分模式
SMRTSIZE, 3 !设置网格密度
MSHAPE, 1, 3d
VMESH, 1 !对圆柱体进行自由网格划分
FINISH
! (5) 加载与求解
/SOLU
ANTYPE, 0
DA, 1, ALL !对 A1 的面施加 X 位移全约束
SFA, 2, 1, PRES, -1000 !对 A2 的面施加力
NSEL, S, LOC, X, 1.5 !选择 X=1.5 上的点
NSEL, R, LOC, Y, 0 !从所选点上选择 Y=0 的点
F, ALL, FX, -100 !对所选的点施加集中力
ALLSEL !选择所有元素
SOLVE !发出求解命令
FINISH
! (6) 进入一般后处理模块, 查看结果
/POST1 !进入一般后处理模块
PLDISP, 1 !显示结构变形图, 保留未变形结构轮廓
PLNSOL, U, X, 0, 1.0 !显示结构 X 方向位移图
PLNSOL, S, EQV, 0, 1.0 !显示结构等效应力云图
```

## 本章小结

本章主要介绍了有限元分析的一般步骤为建立几何模型、划分网格、施加载荷、求解设置，以及后处理分析。给出一个简单的例子，通过整个流程的学习和实例练习，初步掌握 ANSYS 有限元分析软件的基本步骤和基本概念，同时要熟悉步骤中的常用操作。

## 思考题

- (1) 建立几何模型的过程可以分为几类，是哪几类？
- (2) 在智能网格划分工具 Mesh Tool 中，可以设置哪些网格类型，该工具还可以进行哪些设置？
- (3) 典型载荷按照类型可分为几类？
- (4) 如何求解多步载荷，如何实现载荷步文件法？
- (5) 后处理可以分为几类，它们有何不同？

## 常见疑难问题解析

在本章的基本步骤和概念学习过程中，或者在做其他 ANSYS 练习可能会遇到的一些问题，现汇总如下：

- (1) 为何将文件换个地方存放就打不开了？

可能是文件名或文件夹含有中文字符的缘故，目录和文件名中不要出现中文字符。

- (2) 如何查看节点编号？

依次单击：Utility Menu→PlotCtrls→Numbering，弹出“Plot Numbering Controls”对话框，勾选“NODE Node numbers”选项的复选框，使其设置为“On”，单击“OK”按钮即可显示。另外，在该对话框中还可以设置节点、关键点、线段、面和体的显示，对应命令流如下：

```
/PNUM, NODE, 1  
/PNUM, KP, 1  
/PNUM, LINE, 1  
/PNUM, AREA, 1  
/PNUM, VOLU, 1
```

若想隐藏时，则将 1 变成 0 即可。

- (3) 在拾取对话框中，输入了节点的编号如“1,2”会提示出错？

在拾取对话框的输入栏中输入“1,2”，逗号要改为是在英文输入法状态下输入，即半

角输入法。

一般来说,如果拾取的对象编号不太清楚,但知道其所在位置,且能方便查看到,那么建议在图形对话框中通过左键单击选取。

(4) 网格模型或者云图只能输出 bmp 格式吗?

可以输出多种格式,如 JPEG、TIFF 及 PNG 等多种格式。例如,要输出 JPEG 格式。

GUI 操作路径:

Utility Menu→PlotCtrls→Redirect Plots→To JPEG Files...

弹出“Redirect Plots to JPEG”对话框,单击“OK”按钮即可。

**注意:** 图片会默认保存到当前工作目录下。

(5) 有人说 ANSYS 有单位,还有人说不存在单位问题,如何处理单位问题?

ANSYS 中并不会帮助进行单位换算,但是可以在输入窗口中输入: /UNITS, LABEL 命令来提示自己所采用的单位。

其中,“label”选项中 USER——用户自定义(Default);

SI——国际单位制(SI or MKS; m, kg, s);

CGS——CGS 单位制(cm, g, s);

MPA——MPA 单位制(mm, mg, s);

BFT——英制英尺单位制(ft, slug, s);

BIN——英制英寸单位制(in, lbm, s)。

例如,采用/units, SI, 则长度用 m, 质量用 kg, 而时间用 s。此时力的单位由  $F=m \cdot a$  推得,按标准单位  $N=kg \times m/(s \times s)$ , 即为 N, 应力的单位则由  $\sigma=F/A$ , 标准单位  $Pa=N/(m \times m)$ 。

若将长度单位换成 mm, 则力的单位由  $N \times 10^{-3}=kg \times mm/(s \times s)$  可知为 mN (毫牛), 应力的单位由  $Pa \times 10^6=N/(mm \times mm)$ , 即为 MPa, 此时属于用户自定义。

应力的单位由  $Pa \times 10^6=N/(mm \times mm)$ , 即为 MPa, 此时可用/units, MPA 提示。



## 第 3 章 线性静力分析



### 知识点

- 线性静力分析基本过程
- 杆系结构静力分析
- 梁结构静力分析
- 板壳结构静力分析

### 3.1 线性静力分析基本过程

线性静力分析广泛应用于工程实践中，是工程中最基本的力学分析手段。本节将介绍静力分析的基本概念和运行 ANSYS 程序来实现静力分析的一般步骤。

#### 3.1.1 静力分析概述

ANSYS 软件包括 7 种结构分析类型：静力分析、模态分析、谐波分析、瞬态动力分析、谱分析、屈曲分析和显示动力学分析（ANSYS/LS-DYNA），其中静力分析是结构分析中最基本的类型，它主要是分析由于稳态外载荷所引起的系统或零部件的位移、应力、应变和作用力，很适合求解惯性及阻尼效应对结构响应的影响并不显著的问题。

在结构静力分析过程中，一般都假定载荷和结构响应固定不变，或假定载荷和结构响应随时间的变化都非常缓慢。ANSYS 程序中结构静力分析所施加的稳态载荷主要包括外部施加的力和压力、稳态的惯性力、位移载荷和温度载荷等。

ANSYS 程序进行静力分析包括线性静力分析和非线性静力分析两大类。线性静力分析，即通常所说的线弹性分析；非线性静力分析主要包括材料非线性分析、几何非线性分析、状态非线性分析，以及接触非线性分析。本章主要讨论线性静力分析，后面提及的静力分析指的都是线性静力分析。

### 3.1.2 线性静力分析基本步骤

ANSYS 进行线性静力分析一般包括以下几个基本步骤：

- ① 建立几何模型和网格划分；
- ② 加载求解；
- ③ 结果分析。

#### 1. 【步骤 1】建立几何模型和网格划分

该步骤在/PREP7 前处理器中完成。首先应确立所要进行分析工程的工作文件名、工作标题并定义单元类型、单元实常数、材料模型及其参数，然后再建立几何模型和划分网格。在实际操作中，也可以先建立几何模型，再在网格划分之前定义单元类型、单元实常数、材料模型及其参数。另外，ANSYS 也允许直接通过建立节点及单元来创建有限元模型。

该步骤中应注意以下事项：

- (1) 材料模型可以是各向同性或正交各向异性的，材料参数可为常数，也可为温度的函数。
- (2) 必须定义杨氏模量。
- (3) 对惯性载荷，必须定义与质量有关的量，如密度等。
- (4) 对热载荷（如温度），必须定义热膨胀系数。
- (5) 在对其应力或应变感兴趣的区域需要相对较密的网格。
- (6) 如果需要进一步考虑非线性，有限元网格必须能够捕捉非线性效应。例如，塑性在具有高塑性变形梯度的区域要求有足够的积分点密度。

#### 2. 【步骤 2】加载求解

加载求解包括以下子步骤：

- 1) 进入求解器

命令：/SOLU

GUI 操作路径：

Main Menu→Solution

- 2) 定义分析类别和分析选项

在结构静力分析中，ANSYS 提供的分析类型和分析选项参见表 3-1。

表 3-1 分析类型和分析选项

选 项	命 令	GUI 操作路径
New Analysis	ANTYPE	Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis
Analysis Type: Static	ANTYPE	Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis
Large Deformation Effects	NLGEM	Main Menu→Solution→Analysis Options
Stress Stiffening Effects	SSTIF	Main Menu→Solution→Analysis Options
Prestres Effects Calculation	PSTRES	Main Menu→Solution→Analysis Options

续表

选 项	命 令	GUI 操作路径
Newton-Raphson Option	NROPT	Main Menu→Solution→Analysis Options
Mass Matrix Formation	LUMPM	Main Menu→Solution→Analysis Options
Equation Solver	EQSOLV	Main Menu→Solution→Analysis Options
Fast Solution Option	EQSLV	Main Menu→Solution→Fast Solution Option

**注意：**表 3-1 中的 GUI 操作路径是指通过图形用户界面进行操作，而命令则是 GUI 操作路径所对应的命令流关键词。

下面对表 3-1 中提到的分析类型和分析选项进行简要解释。

(1) 分析类型。

一般情况下使用 New Analysis，即进行新的静力分析。

(2) 静态分析。

选择 Static（静态）或 Steady-Static（稳态）。

(3) 大变形或大应变选项。

并不是所有的非线性分析都产生大变形，如果分析中存在大挠度变形或大应变时，应选择“ON”，若不产生大变形，选择“OFF”。程序默认值为“OFF”。

(4) 应力刚化效应。

一般只在下列两种情况下使用此选项：

① 在小变形分析中，希望通过应力刚化明显提高或降低结构中的刚度。例如，受正压力作用的薄圆壳问题。

② 在大变形分析中，希望通过应力刚化提高收敛精度。程序一般默认值为“OFF”，但当 NLGEOM 和 SOLCONTROL 同时打开时，程序默认值为“ON”。

(5) 预应力计算。

通过此选项可以在同一模型上施加预应力分析，程序默认值为“OFF”。

**注意：**应力刚化效应和预应力计算不能同时在分析中使用，如果在同一分析中同时使用了这两个选项，后者将覆盖前者。

(6) Newton-Raphson Option。

牛顿-拉普森选项，只在非线性分析中使用。

(7) 质量矩阵组集。

在有惯性载荷的结构分析中使用。

(8) 方程求解器。

选择求解方法，包括波前求解器（默认）、JCG、ICCG、PCG 和 ITER 等。

(9) 快速求解。

与 ITER 求解器共同使用，可定义不同的精度水平。

3) 施加载荷

可以在实体（如关键点、线、面）上施加载荷，也可以在有限元模型（如节点、单元）上施加载荷。表 3-2 给出了静力分析中可以施加的载荷类型。



表 3-2 静力分析中可施加的载荷类型

载 荷 类 型	命 令	GUI 操作路径
位移约束 (UX, UY, UZ, RO-TX, ROTY, ROTZ)	D	Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→ Structural→Displacement
集中力和力矩 (FX, FY, FZ, MX, MY, MZ)	F	Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→ Structural→Force/Moment
表面载荷 (PRES)	SF	Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→ Structural→Pressure
温度载荷 (TEMP, FLUE)	BF	Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→ Structural→Temperature
惯性载荷 (如重力, 旋转惯性力)	ACEL OMEGA DOMEGA	Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→ Structural→Inertia

4) 指定载荷步选项

一般常用的载荷步选项包括瞬态和静态分析中一个载荷步结束的时间选项；子步的数目或时间步大小的选项；阶梯式或斜增式载荷选项，以及热应变计算中的参考温度选项。

GUI 操作路径：  
Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequenc→Time-Time Step 或 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequenc→Time and Substps

**注意：**若 GUI 界面中没有此项，可依次单击：Main Menu→Solution→Unabridged Menu（此时 Unabridged Menu 变为 Abridged Menu）来显示。

5) 存储文件

命令：SAVE  
GUI 操作路径：  
Utility Menu→File→Save As

6) 开始求解计算

命令：SOLVE  
GUI 操作路径：  
Main Menu→Solution→Solve→Current LS

7) 退出求解器

命令：FINISH  
GUI 操作路径：  
Main Menu→Finish

3. 【步骤 3】结果分析

静态分析的结果保存在结果文件 Jobname.RST 中，它们由两类数据构成：一类是基本数

据,如节点位移 (UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ); 另一类是派生数据,如节点和单元应力、节点和单元应变、单元力和节点反力等。

读入所需的结果序列,进行必要的 POST1 操作和 POST26 操作。POST1 后处理器可以检查整个模型在指定时间步下的计算结果;而时间历程后处理器 POST26 可以检查模型上某个单元或节点在整个时间历程内的响应。

## 3.2 杆系结构静力分析

杆系结构静力分析是指在已知静力载荷条件下,杆系结构的内力和位移计算。该结构是用杆件相互连接而组成的几何不变体系,如桁架、刚架、拱、悬索结构、网架结构等。杆系结构可以是静定的,也可以是超静定的。本小节将介绍杆系结构的定义,以及常用的杆单元,并给出一个由杆单元组成的人字形屋架的静力分析。

### 3.2.1 杆系结构的定义

杆系结构是指由细长杆件构成的结构系统,杆件的弯曲刚度较小,弯曲产生的应力和轴向应力相比较小,杆件变形主要是轴向拉伸和压缩变形。杆系结构的计算主要是得到桁架结构的变形、内力和反力。这种结构由若干杆件组成,在土木、建筑、机械、船舶、水利等工程中应用很广。

在杆系结构中,每根杆件的汇交连接处称为节点。在每一节点处,各杆端之间不得有相对线位移。节点分为铰节点和刚节点。杆件在节点处铰接时称为桁架,刚接时称为刚架。在铰接点上,各杆件之间的夹角可以自由改变,铰接点不能传递力矩;在刚节点上,各杆件之间夹角保持不变,刚节点能传递力矩。在有限元分析中,桁架采用杆单元离散分析,刚架采用梁单元离散分析。

对于平面桁架,通常引用以下假定:

- (1) 各节点都是无摩擦的理想铰。
- (2) 各杆轴都是直线,并在同一平面内且通过铰的中心。
- (3) 载荷只作用在节点上,并在桁架的平面内。

### 3.2.2 ANSYS 常用的杆单元

在 ANSYS 中, LINK1 是二维杆单元, LINK8 是三维杆单元。LINK1 单元两端有 2 个节点,每个节点有 2 个线位移。LINK8 单元也有 2 个节点,但每个节点有 3 个线位移。对于许多杆系空间结构需要利用 LINK8 单元来求解。

杆系结构静力分析第一步是建立模型(/PREP7 模块命令)。通常用指令 N 定义节点信息,用指令 E 定义单元信息。当前单元的单元类型使用默认值,该默认值可以通过指令 TYPE 来改变。杆件单元的几何参数只有截面积 A,而材料参数有弹性模量 EX,热膨胀系数 ALPX、

密度 DENS 和阻尼 DAMP。当前单元的实常数和材料参数使用默认值，该默认值分别可以通过指令 REAL 和 MAT 来改变。

当建立好计算模型后，就可以定义适当的位移边界条件和载荷（/SOLU 模块命令）。位移边界条件由指令 D 定义，载荷由指令 F 定义。然后就可以发出求解命令（/SOLU 模块命令）。ANSYS 系统对每个单元进行刚度矩阵计算后，迭加生成总体刚度矩阵，生成节点载荷向量，通过引入位移边界条件修正总体刚度矩阵和载荷向量后，开始求解位移方程得到各个节点的位移。再次调用单元刚度矩阵来计算单元的内力、位移约束处的反力等。

计算完成后，进入后处理模块 POST1 查看结构变形、应力分布等，变形图通常用 PLDISP 来显示。而杆件的内力则需要利用单元表（ETABLE）定义的方法来获得。

### 3.2.3 实例分析：人字形屋架的静力分析

#### 1. 问题描述

跨度 8m 的人字形屋架，左端是固定铰支座，右端是滑动铰支座。载荷工况，结构尺寸和边界条件如图 3-1 所示。

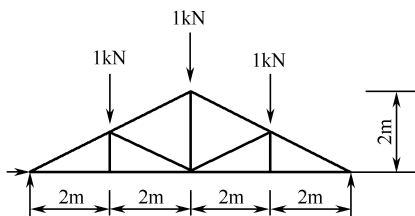


图 3-1 人字形屋架结构尺寸

#### 2. 建立工作文件名和工作标题

##### 1) 定义工作文件名

依次单击：Utility Menu→File→Change Jobname，弹出“Change Jobname”对话框，在“[/FILNAM] Enter new jobname”选项的输入栏中输入工作文件名为“EX3-1”，勾选“New log and error files”选项的“Yes”复选框，然后单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流：

```
/FILENAME, EX3-1
```

##### 2) 定义工作标题

依次单击：Utility Menu→File→Change Title，弹出“Change Title”对话框，在“[/TITLE] Enter new title”选项的输入栏中输入“Plane Roof Truss Model”，然后单击“OK”按钮。

对应命令流：

```
/TITLE, Plane Roof Truss Model
```

### 3) 定义单位制

在命令栏输入窗口中输入“/UNITS, SI”，采用国际单位制。

对应命令流：

```
/UNITS, SI
/PREP7
```

## 3. 定义单元类型及实常数

### 1) 定义单元类型

依次单击：Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete，弹出“Element Types”拾取对话框。单击“Add...”按钮，弹出“Library of Element Types”对话框，如图 3-2 所示，在“Library of Element Types”选项的左列表框中选择“Structural Mass→Link”，右列表框中选择“2D spar 1”；在“Element type reference number”选项的输入栏中输入“1（默认）”，单击“OK”按钮关闭该对话框。然后再单击拾取对话框中的“Close”按钮关闭该拾取对话框。

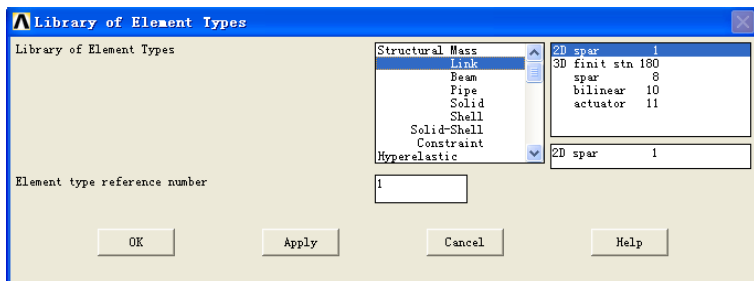


图 3-2 “Library of Element Types”对话框

对应命令流：

```
ET, 1, LINK1
```

### 2) 定义实常数

依次单击：Main Menu→Preprocessor→Real Constants→Add/Edit/Delete，弹出“Real Constants”拾取对话框，单击“Add...”按钮，弹出“Element Type for Real Constants”对话框，单击“OK”按钮，弹出“Real Constant Set Number 1, for LINK1”对话框，如图 3-3 所示。在“Cross-sectional area AREA”选项的输入栏中输入“0.01”，单击“OK”按钮关闭该对话框。然后再单击“Real Constants”拾取对话框中“Close”按钮，退出实常数设置。

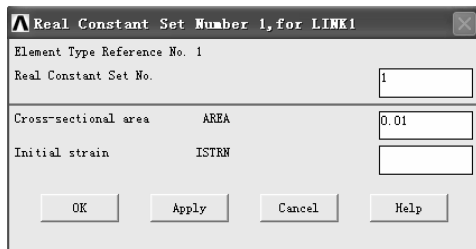


图 3-3 “Real Constant Set Number 1, for LINK1”对话框

对应命令流:

```
R, 1, 0.01
```

#### 4. 定义材料性能参数

##### 1) 定义材料

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Material Models, 弹出“Define Material Model Behavior”对话框。在“Material Models Available”选项框中依次单击: Structural→Linear→Elastic→Isotropic, 弹出“Linear Isotropic Properties for Material Number 1”对话框, 如图 3-4 所示, 在“EX”选项的输入栏中输入“ $2.1\text{e}11$ ”, 在“PRXY”选项的输入栏中输入“0.3”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

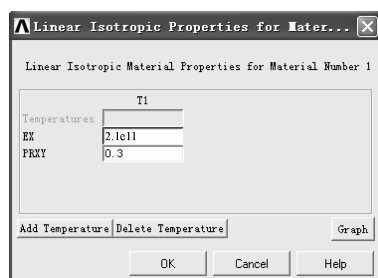


图 3-4 “Linear Isotropic Properties for Material Number 1”对话框

##### 2) 退出材料设置

在“Define Material Model Behavior”对话框中, 依次单击: Material→Exit, 或者直接单击对话框右上角关闭按钮关闭该对话框, 退出材料属性设置。

对应命令流:

```
MP, EX, 1, 2.1e11
MP, PRXY, 1, 0.3
```

#### 5. 生成节点

##### 1) 创建第一个节点

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Nodes→In Active CS, 弹出“Create Nodes in Active Coordinate System”对话框, 如图 3-5 所示。在“NODE Node number”选项的输入栏中输入“1”, 在“X,Y,Z Location in active CS”选项的输入栏中分别输入“0”, “0”和“0”, 单击“Apply”按钮, 节点 1 将出现在 ANSYS 图形窗口中。

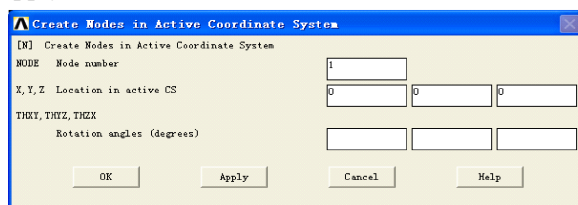


图 3-5 “Create Nodes in Active Coordinate System”对话框

**注意：**平面问题中节点坐标 Z 可以不填，默认为 0。

对应命令流：

```
N, 1, 0, 0
```

## 2) 打开节点编号和单元编号显示控制

依次单击：Utility Menu→PlotCtrls→Numbering，弹出“Plot Numbering Controls”对话框，如图 3-6 所示。勾选“NODE Node numbers”选项的复选框，使其设置为“On”；在“Elem/Attrib numbering”选项的下拉列表中选择“Element numbers”，单击“OK”按钮。

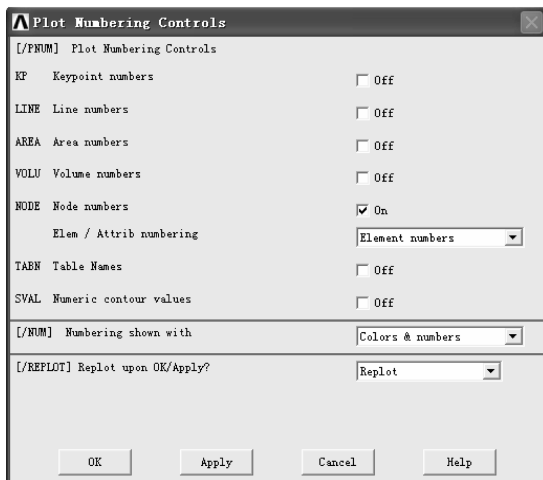


图 3-6 “Plot Numbering Controls”对话框

**注意：**上述设置是为了在图形窗口显示节点和单元的编号，设置好时图形窗口会显示编号为 1 的节点，由于与坐标系重合，故看不出来。另外，如果没有节点或单元，则不显示编号。同样，在该对话框中还可设置/显示关键点、线段、面，以及体等元素的编号。

对应命令流：

```
/PNUM,NODE,1      !显示节点编号
/PNUM,ELEM,1      !显示单元编号
```

## 3) 退出创建节点

继续在“Create Nodes in Active Coordinate System”对话框中创建节点，生成节点 2~8，各节点编号和坐标参见表 3-3。最后单击“OK”按钮关闭该对话框，退出创建节点。

表 3-3 节点坐标表

节点编号	1	2	3	4	5	6	7	8
X 坐标	0	2	4	6	8	2	6	4
Y 坐标	0	0	0	0	0	1	1	2

对应命令流：

```
N, 2, 2, 0
N, 3, 4, 0
```

N, 4, 6, 0  
N, 5, 8, 0  
N, 6, 2, 1  
N, 7, 6, 1  
N, 8, 4, 2

6. 生成单元

1) 创建一个单元

依次单击：Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Auto Numbered→Thru Nodes，弹出“Elements from Nodes”拾取对话框，在图形窗口分别拾取节点 1 和节点 2（按照该顺序）后，单击“Apply”按钮，在图形窗口节点 1、2 间将生成一个杆单元 1。

对应命令流：

E, 1, 2

2) 创建其他单元

继续在“Elements from Nodes”拾取对话框中创建单元，通过拾取其他节点，生成单元 2~13，各单元及单元节点编号参见表 3-4。最后单击“OK”按钮关闭该对话框，退出创建单元。

表 3-4 单元及单元节点编号表

单元编号	1	2	3	4	5	6	7
节点 I	1	2	3	4	1	6	6
节点 J	2	3	4	5	6	2	3
单元编号	8	9	10	11	12	13	
节点 I	8	7	7	7	6	8	
节点 J	3	3	4	5	8	7	

对应命令流：

E, 2, 3  
E, 3, 4  
E, 4, 5  
E, 1, 6  
E, 6, 2  
E, 6, 3  
E, 8, 3  
E, 7, 3  
E, 7, 4  
E, 7, 5  
E, 6, 8  
E, 8, 7

## 7. 加载求解

### 1) 定义求解类型

依次单击: Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis, 弹出“New Analysis”对话框, 在“[ANTYPE] Type of analysis”选项的下拉列表中选择“Static”类型, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
ANTYPE, STATIC
```

### 2) 设置输出结果选项

依次单击: Main Menu→Solution→Analysis Type→Sol'n Controls, 弹出“Solution Controls”对话框, 在“Write Items to Results File”选项的下拉列表中选择“All solution items”(默认选项), 单击“OK”按钮。

对应命令流:

```
OUTPR, BASIC
```

### 3) 施加位移全约束

依次单击: Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes, 弹出“Apply U,ROT on Nodes”拾取对话框, 在其输入栏中输入“1”(也可在图形窗口中用鼠标点取节点 1), 单击“OK”按钮关闭该拾取对话框。弹出“Apply U,ROT on Nodes”对话框, 如图 3-7 所示。在“Lab2 DOFs to be constrained”选项组中选择“All DOF”, 在“VALUE Displacement value”选项的输入栏中输入“0”, 单击“Apply”按钮完成节点 1 的约束施加, 可以继续施加其他节点的约束。

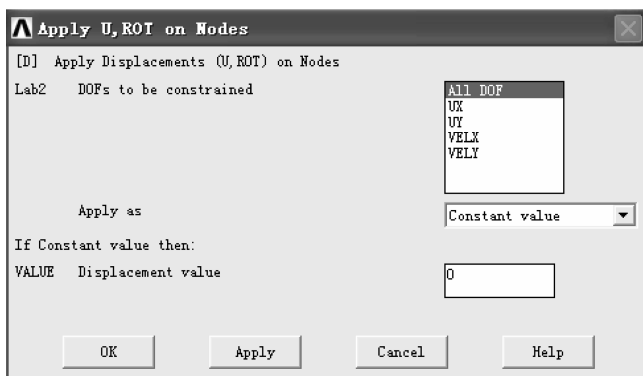


图 3-7 “Apply U,ROT on Nodes”对话框(一)

**注意:**“VALUE Displacement value”选项的输入栏中空白时默认为 0, 可不用输入 0。

对应命令流:

```
D, 1, ALL, 0
```

### 4) 施加 Y 方向位移约束

在“Apply U,ROT on Nodes”拾取对话框的输入栏中输入“5”(也可在图形窗口中用鼠



标点取节点 5)，单击“OK”按钮关闭该拾取对话框，弹出“Apply U,ROT on Nodes”对话框，如图 3-8 所示。在“Lab2 DOFs to be constrained”选项组中选择“UY”，在“VALUE Displacement value”选项的输入栏中输入“0”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

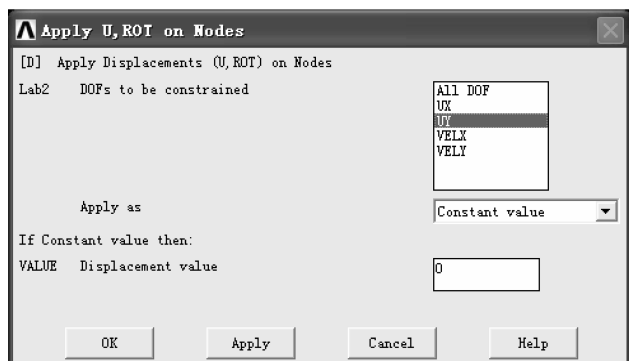


图 3-8 “Apply U,ROT on Nodes”对话框（二）

**注意：**在“Apply U,ROT on Nodes”拾取对话框中，单击“Apply”和“OK”按钮的区别：前者表示施加位移约束后回到“Apply U,ROT on Nodes”拾取对话框，继续选择节点施加约束；后者则表示施加位移约束后，退出位移约束设置。

对应命令流：

D, 5, UY, 0

#### 5) 施加集中载荷

依次单击：Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Force/Moment→On Nodes，弹出“Apply F/M on Nodes”拾取对话框，在其输入栏中输入“6,7,8”（也可在图形窗口中用鼠标点取节点 6，7，8），单击“OK”按钮，弹出“Apply F/M on Nodes”对话框，如图 3-9 所示。在“Lab Direction of force/mom”选项的下拉列表中选择“FY”，在“VALUE Force/moment value”选项的输入栏中输入“-1000”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

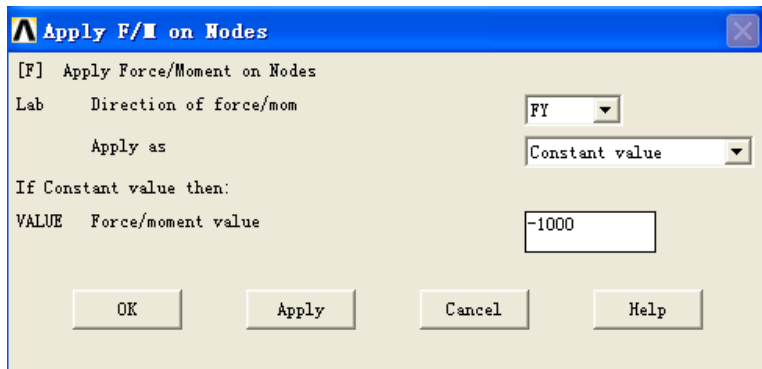


图 3-9 “Apply F/M on Nodes”对话框

**注意：**输入栏中的“6,7,8”之间的逗号，以及命令流中的标点符号均要用英文输入法输入，即半角字符。

对应命令流:

```
F, 6, FY, -1000
F, 7, FY, -1000
F, 8, FY, -1000
```

#### 6) 求解

依次单击: Main Menu→Solution→Solve→Current LS, 弹出“/STATUS Command”文本框及“Solve Current Load Step”对话框, 浏览完毕文本框后单击其右上角的关闭按钮退出文本框。单击该对话框上的“OK”按钮, ANSYS 开始求解计算, 求解完成后, 弹出“Note”对话框, 单击“Close”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
SOLVE
FINISH
```

### 8. 进入一般后处理, 查看结果

#### 1) 查看变形图

依次单击: Main Menu→General Postproc→Plot Results→Deformed Shape, 弹出“Plot Deformed Shape”对话框, 在“KUND Items to be plotted”选项的下拉列表中选择“Def + undeformed”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。显示结构变形图, 保留未变形结构轮廓, 如图 3-10 所示。

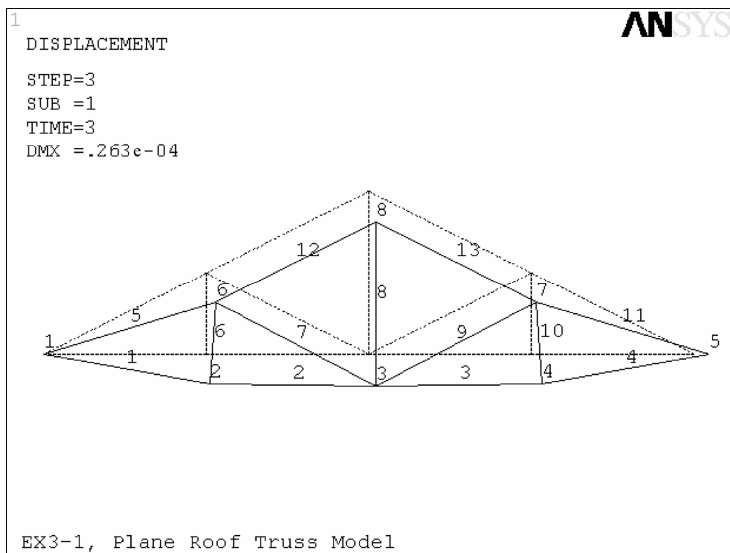


图 3-10 图形显示人字形屋架结构变形

对应命令流:

```
/POST1
PLDISP, 2
```

### 2) 查看 Y 方向位移

依次单击: Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu, 弹出“Contour Nodal Solution Data”对话框, 在“Item to be contoured”选项框中依次单击: Nodal Solution→DOF Solution→Y-Component of displacement, 单击“OK”按钮。显示 Y 方向位移图, 如图 3-11 所示。

对应命令流:

```
PLNSOL, U, Y
```

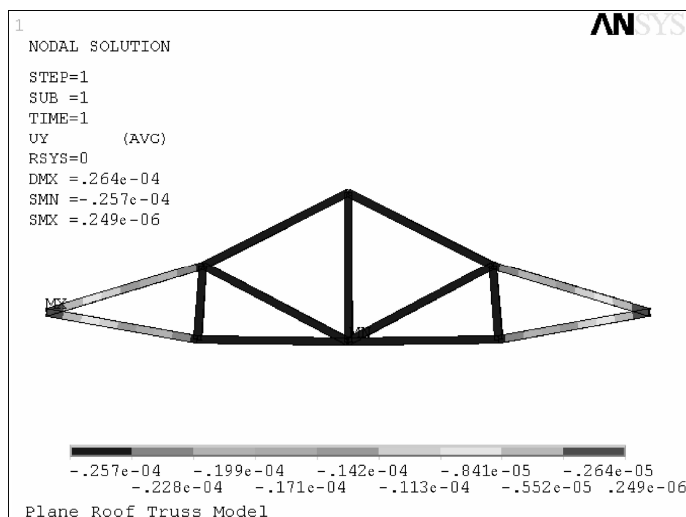


图 3-11 图形显示人字形屋架结构 Y 方向位移

### 3) 查看节点支座反力

依次单击: Main Menu→General Postproc→List Result→Reaction Solu, 弹出“List Reaction Solution”对话框, 在“Lab Item to be listed”选项的下拉列表中选择“All items”, 单击“OK”按钮。弹出“PRRSOL Command”文本框, 如图 3-12 所示, 显示结构节点支座反力计算结果。

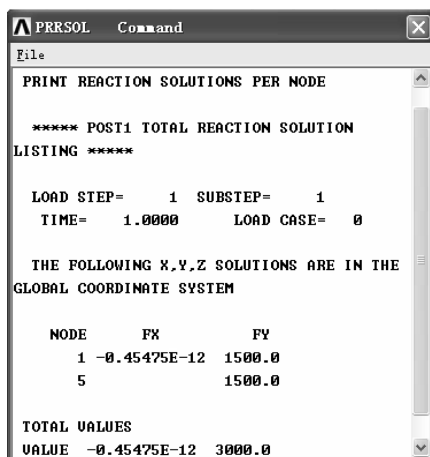


图 3-12 “PRRSOL Command”文本框

对应命令流:

PRRSOL

#### 4) 查看节点位移

依次单击: Main Menu→General Postproc→List Result→Nodal Solution→DOF Solution→Displacement vector sum, 弹出“List Nodal Solution”对话框, 依次单击: Nodal Solution→DOF Solution→Y-Component of displacement(或者 X-Component of displacement), 单击“OK”按钮, 弹出“PRDISP Command”文本框, 如图 3-13 所示, 显示节点位移计算结果。

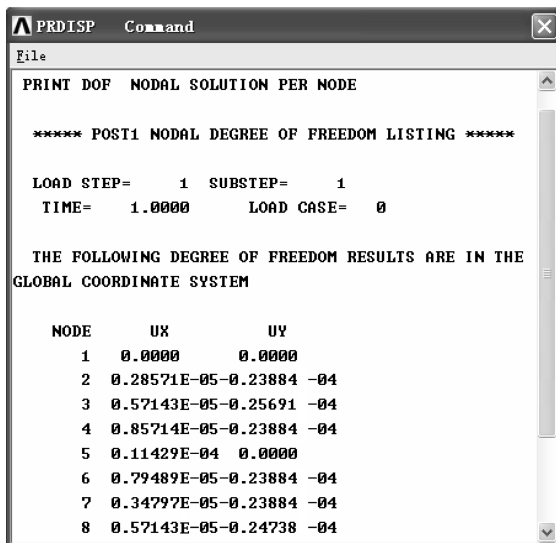


图 3-13 “PRDISP Command”文本框

对应命令流:

PRDISP

#### 5) 定义杆单元轴力表

依次单击: Main Menu→General Postproc→Element Table→Define Table, 弹出“Element Table Data”拾取对话框, 单击“Add...”按钮, 弹出“Define Additional Element Table Items”对话框, 如图 3-14 所示。在“Lab User label for item”选项的输入栏中输入“MF”, 在“Item,Comp Results data item”选项的左侧下拉列表中选择“By sequence num”, 右侧列表中选择“SMISC”并在其下的输入栏中输入“SMISC,1”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。然后单击“Element Table Data”拾取对话框上的“Close”按钮。

对应命令流:

ETABLE, MF, SMISC,1

#### 6) 列表显示单元轴力

依次单击: Main Menu→General Postproc→Element Table→List Elem Table, 弹出“List Element Table Data”对话框, 在该对话框的右侧下拉列表中选择“MF”, 单击“OK”按钮

关闭对话框。弹出“PRETAB Command”文本框，如图 3-15 所示，显示各杆单元的轴力。

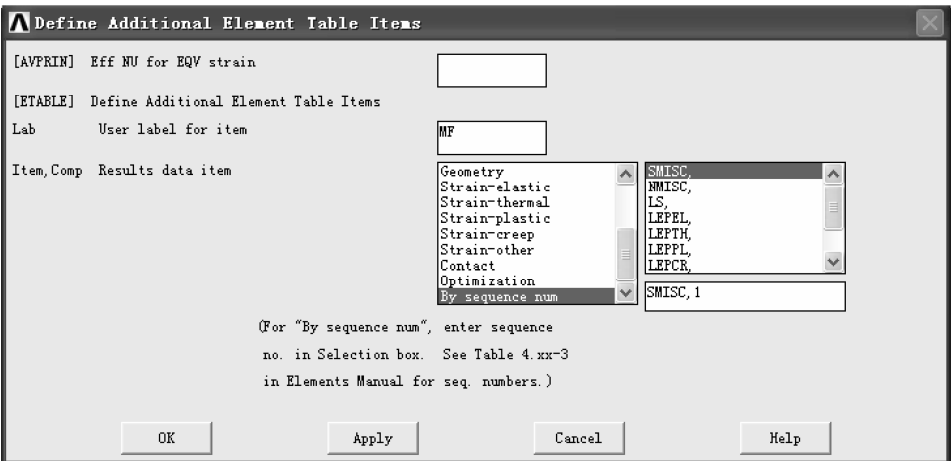


图 3-14 “Define Additional Element Table Items”对话框

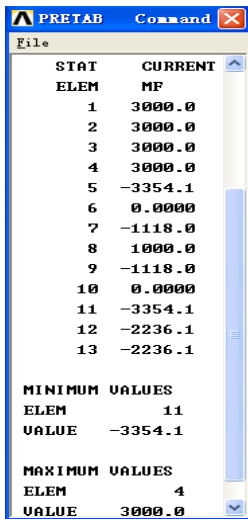


图 3-15 “PRETAB Command”文本框

对应命令流：

```
PRETAB, MF
```

7) 退出 ANSYS

依次单击：Utility Menu→File→Exit，弹出“Exit form ANSYS”对话框，选择“Save Everything”，单击“OK”按钮退出 ANSYS 程序。

9. 人字形屋架的静力分析完整命令流

FINISH	!退出以前模块
/CLCER,START	!清除系统中所有数据，读入启动文件设置

! (1) 建立工作文件名和工作标题

/FILNAME, EX3-1

/TITLE, Plane Roof Truss Model

/UNITS, SI

/PREP7

! (2) 定义单元类型及实常数

ET, 1, LINK1

R, 1, 0.01

! (3) 定义材料性能参数

MP, EX, 1, 2.1e11

MP, PRXY, 1, 0.3

! (4) 生成节点

N, 1, 0, 0

N, 2, 2, 0

N, 3, 4, 0

N, 4, 6, 0

N, 5, 8, 0

N, 6, 2, 1

N, 7, 6, 1

N, 8, 4, 2

! (5) 生成单元

E, 1, 2

E, 2, 3

E, 3, 4

E, 4, 5

E, 1, 6

E, 6, 2

E, 6, 3

E, 8, 3

E, 7, 3

E, 7, 4

E, 7, 5

E, 6, 8

E, 8, 7

/PNUM, NODE, 1

/PNUM, ELEM, 1

EPLOT

FINISH

! (6) 加载求解

/SOLU

ANTYPE, STATIC

OUTPR, BASIC, ALL

D, 1, ALL, 0

D, 5, UY, 0

!指定当前工程的文件名

!定义标题

!采用国际单位制

!进入前处理模块

!定义单元类型为二维杆单元 LINK1

!定义杆件实常数, 截面积  $0.01\text{m}^2$

!定义材料弹性模量

!定义材料泊松比

!生成节点 1, 坐标 (0, 0)

!生成节点 2, 坐标 (2, 0)

!生成节点 3, 坐标 (4, 0)

!生成节点 4, 坐标 (6, 0)

!生成节点 5, 坐标 (8, 0)

!生成节点 6, 坐标 (2, 1)

!生成节点 7, 坐标 (6, 1)

!生成节点 8, 坐标 (4, 2)

!通过节点 1, 2 生成单元 1

!通过节点 2, 3 生成单元 2

!通过节点 3, 4 生成单元 3

!通过节点 4, 5 生成单元 4

!通过节点 1, 6 生成单元 5

!通过节点 6, 2 生成单元 6

!通过节点 6, 3 生成单元 7

!通过节点 8, 3 生成单元 8

!通过节点 7, 3 生成单元 9

!通过节点 7, 4 生成单元 10

!通过节点 7, 5 生成单元 11

!通过节点 6, 8 生成单元 12

!通过节点 8, 7 生成单元 13

!显示节点编号

!显示单元编号

!图形显示单元

!退出前处理模块

!进入求解模块

!定义结构分析类型为静力分析

!在输出结果中, 列出所有载荷步计算结果

!对节点 1 施加所有方向的位移约束

!对节点 5 施加竖直方向 UY 的位移约束

F, 6, FY, -1000	!对节点 6 施加 Y 方向的集中力-1000N
F, 7, FY, -1000	!对节点 7 施加 Y 方向的集中力-1000N
F, 8, FY, -1000	!对节点 8 施加 Y 方向的集中力-1000N
SOLVE	!发出求解命令
FINISH	!退出求解模块
! (7) 进入一般后处理, 查看结果	
/POST1	!进入一般后处理模块
PLDISP, 2	!显示结构变形图, 保留未变形结构轮廓
PLNSOL, U, Y	!显示结构 Y 方向位移图
PRRSOL	!显示结构节点支座反力计算结果
PRDISP	!列表显示结构节点位移计算结果
ETABLE, MF, SMISC, 1	!在单元表中定义杆单元轴力
PRETAB, MF	!列表显示杆单元轴力
FINISH	!退出后处理模块

### 3.3 梁结构静力分析

梁结构的静力分析是指在已知静力载荷情况下, 计算梁结构的内力和位移。同杆结构一样, 梁结构可以是静定梁也可以是超静定梁。不同于杆单元之处在于: 杆单元只能承受拉压载荷, 梁单元则可以承受拉压弯扭载荷。本小节将简要介绍梁结构的定义, 以及常用梁单元, 并给出一个工字截面梁平面弯曲分析。

#### 3.3.1 梁结构的定义

梁是组成各种结构的基本构件之一, 本身也是工程中应用最广的受弯结构, 如梁桥与建筑的梁柱体系。和杆系相比, 梁系结构构件的弯曲效应就需要考虑了, 也就是说, 梁结构节点的广义位移在线位移的基础上增加了角位移。

#### 3.3.2 ANSYS 常用的梁单元

在 ANSYS 中二维梁单元和三维梁单元最常用的分别是 BEAM3 和 BEAM4, 它们节点上的位移分别为 3 个和 6 个。建立梁结构的方法和求解步骤与杆系结构完全相同, 唯一不同的就是单元的特性和单元内力属性。

#### 3.3.3 实例分析: 工字截面梁平面弯曲分析

##### 1. 问题描述

有一工字截面悬臂梁, 左端固定约束, 右端为自由端, 梁长为 2m。整个梁长范围内承

受向下均布载荷  $P=2000\text{ N/m}$ 。

## 2. 建立工作文件名和工作标题

### 1) 定义工作文件名

依次单击: Utility Menu→File→Change Jobname, 弹出“Change Jobname”对话框。在“[/FILNAM] Enter new jobname”选项的输入栏中输入工作文件名为“EX3-2”, 勾选“New log and error files”选项的“Yes”复选框, 然后单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
/FILENAME, EX3-2
```

### 2) 定义工作标题

依次单击: Utility Menu→File→Change Title, 弹出“Change Title”对话框, 在“[/TITLE] Enter new title”选项的输入栏中输入“工 Beam Model”, 然后单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
/TITLE, 工 Beam Model
```

### 3) 定义单位制

在命令栏输入窗口中输入“/UNITS, SI”, 采用国际单位制。

对应命令流:

```
/UNITS, SI  
/PREPT
```

## 3. 定义单元类型及实常数

### 1) 定义单元类型

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete, 弹出“Element Types”拾取对话框。单击“Add...”按钮, 弹出“Library of Element Types”对话框, 在“Library of Element Types”选项的左列表框中选择“Structural→Beam”, 右列表框中选择“2D elastic3”; 在“Element Type reference number”选项的输入栏中输入“1”(默认), 单击“OK”按钮关闭该对话框。然后再单击“Element Types”对话框上的“Close”按钮。

对应命令流:

```
ET, 1, BEAM3
```

### 2) 定义实常数

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Real Constants→Add/Edit/Delete, 弹出“Real Constants”拾取对话框, 单击“Add...”按钮, 弹出“Element Type for Real Constants”对话框, 单击“OK”按钮, 弹出“Real Constants for BEAM3”对话框, 如图 3-16 所示。在“Cross-sectional area AREA”选项的输入栏中输入“ $66.55\text{e-}4$ ”, 在“Area moment of inertia IZZ”选项的输入栏中输入“ $19\text{e-}5$ ”, 在“Total beam height HEIGHT”选项的输入栏中输入“0.32”。单击“OK”按钮关闭该对话框。然后再单击“Real Constants”拾取对话框上的“Close”按钮, 退出实常数设置。



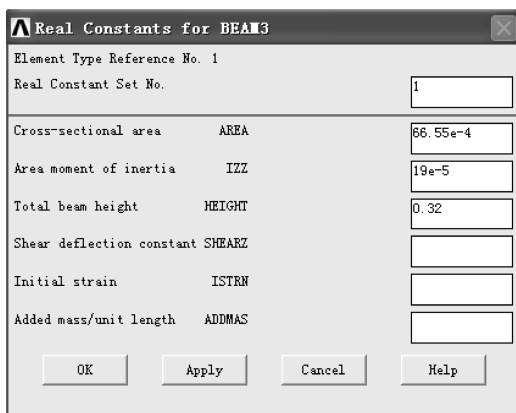


图 3-16 “Real Constants for BEAM3”对话框

对应命令流:

```
R, 1, 0.006 655, 0.000 19, 0.32
```

#### 4. 定义材料性能参数

##### 1) 定义材料

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Material Models, 弹出“Define Material Model Behavior”对话框。在“Material Models Available”选项框中依次单击: Structural→Linear→Elastic→Isotropic, 弹出“Linear Isotropic Properties for Material Number 1”对话框, 如图 3-17 所示, 在“EX”选项的输入栏中输入“2.1e11”, 在“PRXY”选项的输入栏中输入“0.3”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

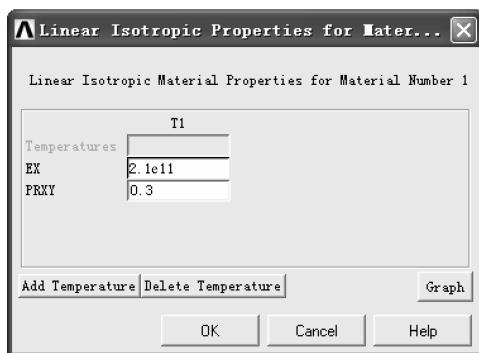


图 3-17 “Linear Isotropic Properties for Material Number 1”对话框

##### 2) 退出材料设置

在“Define Material Model Behavior”对话框中, 依次单击: Material→Exit, 或者直接单击对话框右上角关闭按钮关闭该对话框, 退出材料属性设置。

对应命令流:

```
MP, EX, 1, 2.1e11
MP, PRXY, 1, 0.3
```

### 3) 设置工字梁特征参数

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Sections→Beam→Common Sections, 弹出“Beam Tool”拾取对话框, 如图 3-18 所示。在“Sub-Type”选项的下拉列表中选择工字梁标记“工”, 在“W1”, “W2”, “W3”, “t1”, “t2”, “t3”选项的输入栏中分别输入“0.13”, “0.13”, “0.32”, “0.015”, “0.015”, “0.0095”, 然后单击“OK”按钮关闭该对话框。

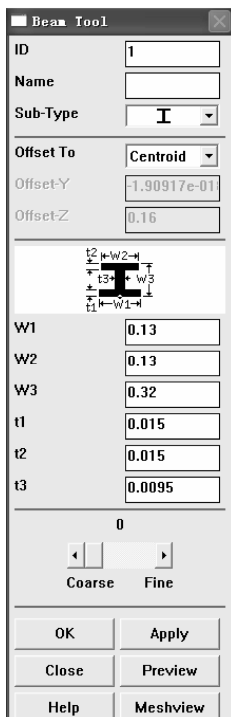


图 3-18 “Beam Tool”拾取对话框

对应命令流:

```
SECTYPE, 1, BEAM, 工
SECDATA, 0.13, 0.13, 0.32, 0.015, 0.015, 0.0095
```

## 5. 生成几何模型、划分网格

### 1) 创建关键点 1

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→In Active CS, 弹出“Create Keypoints in Active Coordinate System”对话框。在“NPT Keypoint number”选项的输入栏中输入“1”, 在“X, Y, Z Location in active CS”选项的输入栏中分别输入“0”, “0”, “0”。

对应命令流:

```
K, 1, 0, 0, 0
```

## 2) 创建关键点 2

单击“Apply”按钮，再次弹出“Create Keypoints in Active Coordinate System”对话框。在“NPT Keypoint number”选项的输入栏中输入“2”，在“X, Y, Z Location in active CS”选项的输入栏中分别输入“2”，“0”，“0”，然后单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流：

```
K, 2, 2, 0, 0
```

## 3) 打开节点编号和单元编号显示控制

依次单击：Utility Menu→PlotCtrls→Numbering，弹出“Plot Numbering Controls”对话框，勾选“KP Keypoint numbers”选项的复选框使其设置为“ON”，勾选“NODE Node numbers”选项的复选框使其设置为“ON”，勾选“LINE Line numbers”选项的复选框使其设置为“ON”，在“Elem/Attrib numbering”选项的下拉列表中选择“Element numbers”，单击“OK”按钮。

对应命令流：

```
/PNUM, KP, 1  
/PNUM, NODE, 1  
/PNUM, LINE, 1  
/PNUM, ELEM, 1
```

## 4) 由关键点生成线

依次单击：Main Menu→Preprocessor→Create→Lines→Lines→In Active CS，弹出“Lines in Active”拾取对话框。在图形窗口中，拾取关键点 1 和 2，单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流：

```
L, 1, 2
```

## 5) 预设网格种子

依次单击：Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→Manual Size→Lines→Picked Lines，弹出“Element Sizes on Picked Lines”拾取对话框，在图形窗口中选取编号为“L1”的线段，单击“OK”按钮，弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，如图 3-19 所示。在“NDIV No. of element divisions”选项的输入栏中输入“20”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

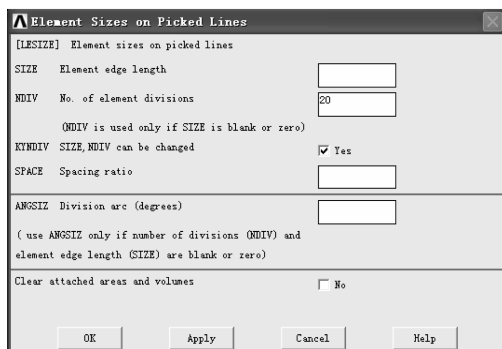


图 3-19 “Element Sizes on Picked Lines”对话框

对应命令流:

```
LESIZE, 1, , , 20
```

## 6) 网格划分

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Lines, 弹出“Mesh Lines”拾取对话框, 在图形窗口中选取编号为“L1”的线段, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
LMESH, 1
```

## 6. 加载求解

### 1) 定义求解类型

依次单击: Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis, 弹出“New Analysis”对话框, 选择分析类型为“Static”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
ANTYPE, STATIC
```

### 2) 设置输出结果选项

依次单击: Main Menu→Solution→Analysis Type→Sol'n Controls, 弹出“Solution Controls”对话框, 在“Write Items to Results File”选项组中选择“All solution items”(默认选项), 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
OUTPR, BASIC, ALL
```

### 3) 施加位移全约束

依次单击: Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes, 弹出“Apply U,ROT on Nodes”拾取对话框。在其输入栏中输入“1”(也可在图形窗口中用鼠标点取节点1), 单击“OK”按钮关闭该拾取对话框。弹出“Apply U,ROT on Nodes”对话框, 如图3-20所示。在“Lab2 DOFs to be constrained”选项组中选择“All DOF”, 在“VALUE Displacement value”选项的输入栏中输入“0”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
D, 1, ALL, 0
```

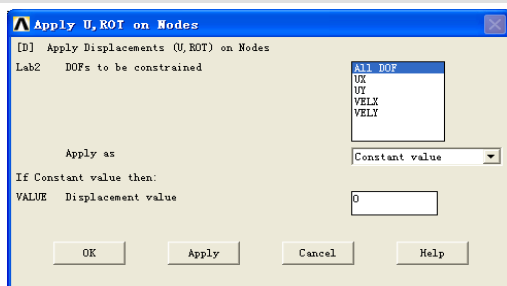


图 3-20 “Apply U,ROT on Nodes”对话框

#### 4) 施加均布载荷

依次单击: Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Pressure→On Beams, 弹出“Apply PRES on Beams”拾取对话框, 单击“Pick All”按钮, 弹出“Apply PRES on Beams”对话框, 如图 3-21 所示。在“VALI Pressure value at node I”和“VALJ Pressure value at node J”选项的输入栏中分别输入“2000”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

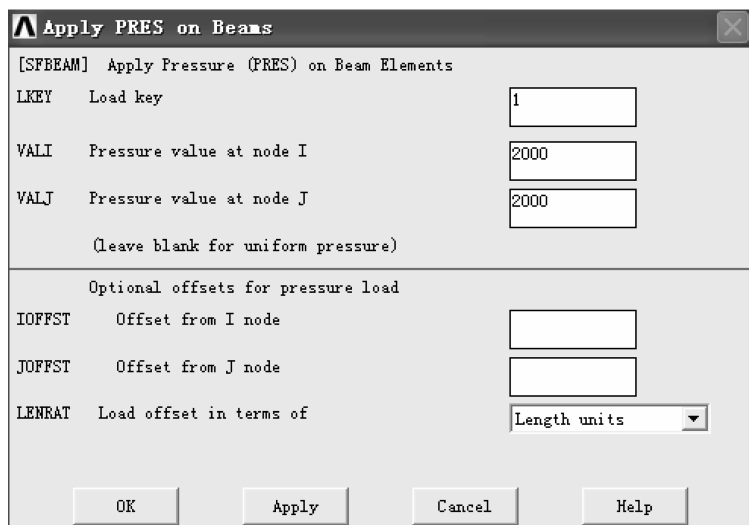


图 3-21 “Apply PRES on Beams”对话框

对应命令流:

```
SFBEAM, ALL, 1, PRES, 2000, 2000
```

#### 5) 求解

依次单击: Main Menu→Solution→Solve→Current LS, 弹出“Solve Current Load Step”对话框及“/STATUS Command”文本框, 浏览完毕文本框后单击“File→Close”按钮退出文本框。单击“Solve Current Load Step”对话框上的“OK”按钮, ANSYS 开始求解计算, 求解完成后, 弹出“Note”对话框, 单击“Close”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
SOLVE  
FINISH
```

### 7. 进入一般后处理模块, 查看结果

#### 1) 查看变形图

依次单击: Main Menu→General Postproc→Plot Results→Deformed Shape, 弹出“Plot Deformed Shape”对话框, 在“KUND Items to be plotted”选项的下拉列表中选择“Def + undeformed”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。显示结构变形图, 保留未变形结构轮廓, 如图 3-22 所示。

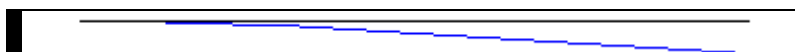


图 3-22 图形显示工字截面梁结构变形

对应命令流:

```
PLDISP, 2
```

## 2) 查看节点支座反力

依次单击: Main Menu→General Postproc→List Result→Reaction Solu, 弹出“List Reaction Solution”对话框, 在“Lab Item to be listed”选项的下拉列表中选择“All items”, 单击“OK”按钮, 弹出“PRRSOL Command”文本框, 如图 3-23 所示, 显示结构支座反力计算结果。

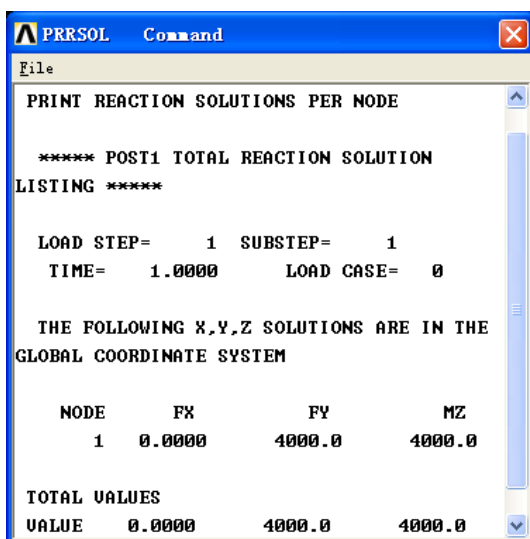


图 3-23 “PRRSOL Command”文本框

对应命令流:

```
PRRSOL
```

## 3) 定义梁单元弯矩表

依次单击: Main Menu→General Postproc→Element Table→Define Table, 弹出“Element Table Data”拾取对话框, 单击“Add...”按钮, 弹出“Define Additional Element Table Items”对话框, 如图 3-24 所示。在“Lab User label for item”选项的输入栏中输入“IMOMENT”, 在“Item, Comp Results data item”选项的左侧列表中选择“By sequence num”, 右侧列表中选择“SMISC”并在其下输入栏中输入“SMISC,6”, 单击“Apply”按钮, 继续弹出“Define Additional Element Table Items”对话框。在“Lab User label for item”选项的输入栏中输入“JMOMENT”, 在“Item, Comp Results data item”选项的左侧列表中选择“By sequence num”, 右侧列表中选择“SMISC”并在其下输入栏中输入“SMISC,12”, 如图 3-25 所示, 单击“OK”按钮关闭该对话框。单击“Element Table Data”拾取对话框上的“Close”按钮关闭该拾取对话框。

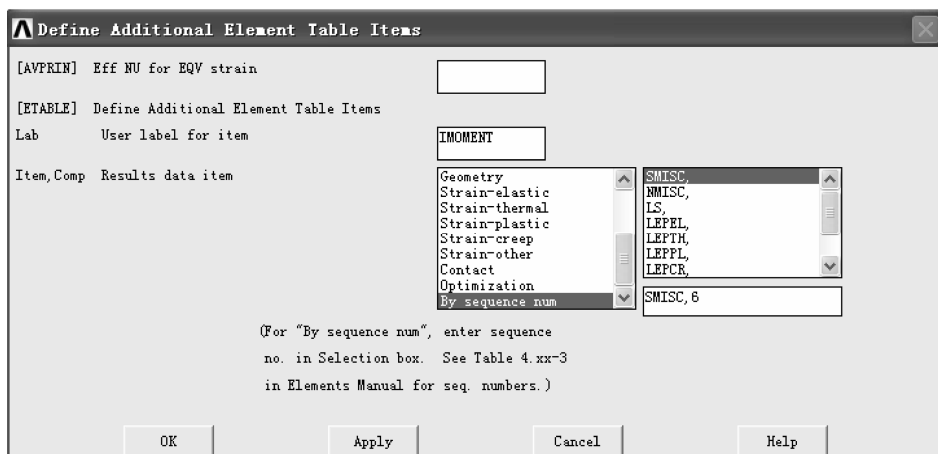


图 3-24 “Define Additional Element Table Items”对话框（一）

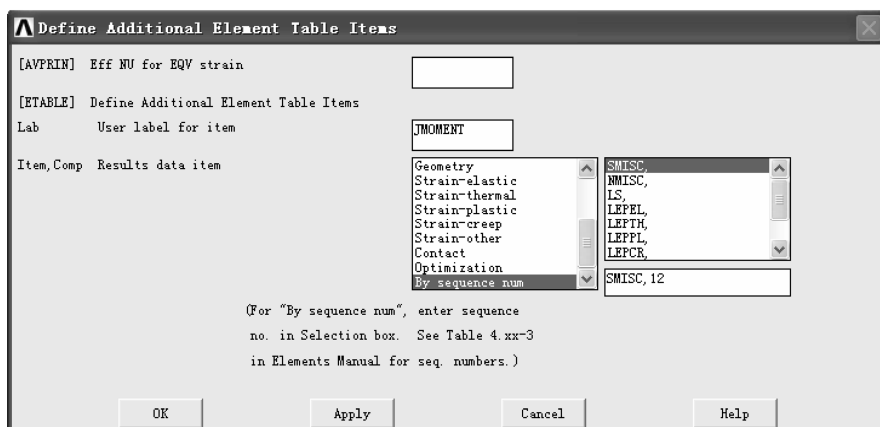


图 3-25 “Define Additional Element Table Items”对话框（二）

对应命令流:

```
ETABLE, IMOMENT, SMISC, 6
ETABLE, JMOMENT, SMISC, 12
```

#### 4) 绘制梁结构弯矩图

依次单击: Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Line Elem Res, 弹出“Plot Line-Element Results”对话框, 在“LabI Elem table item at node I”选项的下拉列表中选择“IMOMENT”, 在“LabJ Elem table item at node J”选项的下拉列表中选择“JMOMENT”。单击“OK”按钮关闭该对话框。显示工字截面梁结构弯矩图, 如图 3-26 所示。

对应命令流:

```
PLLS, IMOMENT, JMOMENT
```

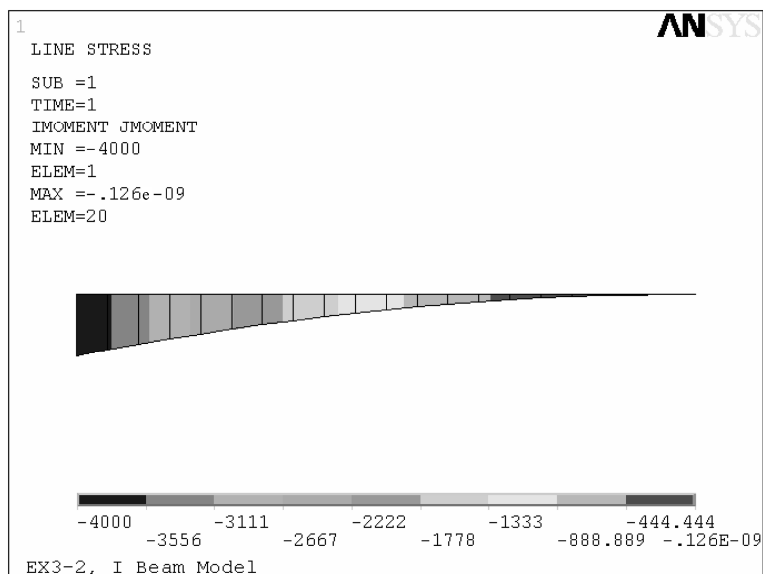


图 3-26 图形显示工字截面梁结构弯矩

### 5) 退出 ANSYS

依次单击: Utility Menu→File→Exit, 弹出“Exit form ANSYS”对话框, 选择“Save Everything”选项, 单击“OK”按钮退出 ANSYS 程序。

## 8. 工字截面梁弯曲静力分析完整命令流

FINISH	!退出以前模块
/CLEAR, START	!清除系统中所有数据, 读入启动文件设置
! (1) 建立工作文件名和工作标题	
/FILENAME, EX3-2	!指定当前工程的文件名
/TITLE, 工 Beam Model	!定义标题
/UNITS, SI	!采用国际单位制
/PREP7	!进入前处理模块
! (2) 定义单元类型及实常数	
ET, 1, BEAM3	!选择梁单元
R, 1, 0.006 655, 0.000 19, 0.32	!设置单元实常数
! (3) 定义材料性能参数	
MP, EX, 1, 2.1e11	!输入材料弹性模量
MP, PRXY, 1, 0.3	!输入材料泊松比
SECTYPE, 1, BEAM, 工	!定义梁的种类
SECDATA, 0.13, 0.13, 0.32, 0.015, 0.015, 0.0095	!输入工字梁的横截面信息
! (4) 生成几何模型、划分网格	
K, 1, 0, 0, 0	!生成关键点 1, 坐标 (0, 0, 0)
K, 2, 2, 0, 0	!生成关键点 2, 坐标 (2, 0, 0)
/PNVM, KP, 1	
/PNVM, NODE, 1	



```
/PNVM, LINE, 1
/PNVM, ELEM, 1
L, 1, 2
LESIZE, 1, , , 20
LMESH, 1
FINISH
! (5) 加载求解
/SOLU
ANTYPE, STATIC
OUTPR, BASIC, ALL
D, 1, ALL, 0
SFBEAM, ALL, 1, PRES, 2000, 2000
SOLVE
FINISH
! (6) 进入一般后处理模块, 查看结果
/POST1
PLDISP, 2
PRRSOL
ETABLE, IMOMENT, SMISC, 6
ETABLE, JMOMENT, SMISC, 12
PLLS, IMOMENT, JMOMENT
FINISH
```

!通过关键点 1 和 2 生成线段 1  
!对线段 1 预设网格种子  
!对线段 1 进行网格划分  
!退出前处理模块  
!进入求解模块  
!定义结构分析类型为静力分析  
!在输出结果中, 列出所有载荷步计算结果  
!对节点 1 施加所有方向的位移约束  
!在梁单元上施加-Y 方向的均布载荷 2kN/m  
!发出求解命令  
!退出求解模块  
!进入一般后处理模块  
!显示结构变形图, 保留未变形结构轮廓  
!显示结构支座反力计算结果  
!以 I 点弯矩定义单元表 IMOMENT  
!以 J 点弯矩定义单元表 JMOMENT  
!绘制结构弯矩图  
!退出后处理模块 POST1

## 3.4 板壳结构静力分析

板壳结构的静力分析是指在已知静力载荷情况下, 计算板壳结构的内力和位移。该结构不同于梁结构之处在于: 受弯曲时, 梁结构一般只发生单向的弯曲; 而板壳结构要承受双向弯曲, 变形以翘曲为主。本小节将简要介绍板壳结构的定义, 以及常用板壳结构, 并给出一个薄板圆孔构件承载分析。

### 3.4.1 板壳结构的定义

虽然实际的工程问题都是存在于 3D 实体的真实世界中, 但是最常用的简化技巧之一是将其简化成 2D 板壳问题。2D 板壳结构问题可以归纳为 3 种情况: 平面应力问题、平面应变问题, 以及轴对称问题。

#### 1. 平面应力问题

平面应力问题是指所有应力都发生在同一平面上 (假设这个平面为  $X$ - $Y$  平面), 在  $Z$  方向没有任何应力分量。

## 2. 平面应变问题

平面应变问题是指所有应变都发生在同一平面上（假设这个平面为  $X$ - $Y$  平面），在  $Z$  方向没有任何应变分量。

平面应变问题与平面应力问题的差异在于：平面应变是  $Z$  方向被完全限制变形，平面应力是  $Z$  方向可以完全自由变形。

## 3. 轴对称问题

轴对称问题普遍存在于真实世界中。当一个结构的几何形状及载荷都对着某一轴形成对称的关系时（此时结构响应也会对该轴形成对称），则称为轴对称问题。

## 3.4.2 ANSYS 常用的板壳单元

在 ANSYS 中，PLANE42 是最基本的 2D 板壳单元。它有 4 个边，因此又称为四边形单元。虽然三角形板壳单元能方便地离散任意 2D 平面结构，但是由于三角形单元为常应变单元，导致结构刚度偏大，计算精度较低，所以在工程中常采用精度较高的四边形单元。同时在 ANSYS 中，也常用 SHELL63 单元来离散 2D 板壳结构，SHELL63 既具有弯曲能力又具有膜力，可以承受平面内载荷和法向载荷。

## 3.4.3 实例分析：薄板圆孔构件承载分析

### 1. 问题描述

一个中心有圆孔的正方形薄板，边长为 1m，圆孔直径为 0.4m。材料属性为弹性模量  $E=2.1e11\text{Pa}$ ，泊松比为 0.3，两竖直边承受拉伸载荷为  $q=1000\text{Pa}$ ，薄板厚度为 0.01m。

根据平板的弹性力学性质，该问题属于平面应力问题。有平板结构的对称性，可以选择整体结构的 1/4 建立几何模型进行分析计算。

### 2. 建立工作文件名和工作标题

#### 1) 定义工作文件名

依次单击：Utility Menu→File→Change Jobname，弹出“Change Jobname”对话框。在“[/FILNAM] Enter new jobname”选项的输入栏中输入工作文件名为“EX3-3”，勾选“New log and error files”选项的“Yes”复选框，单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流：

```
/FILNAME, EX3-3
```

#### 2) 定义工作标题

依次单击：Utility Menu→File→Change Title，弹出“Change Title”对话框，在“[/TITLE] Enter new title”选项的输入栏中输入“The analysis of plane stress with small circle”，单击“OK”

按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
/TITLE, The analysis of plane stress with small circle
```

### 3) 定义单位制

在命令栏输入窗口中输入“/UNITS, SI”，选取采用国际单位制。

对应命令流:

```
/UNITS, SI
```

## 3. 定义单元类型

### 1) 定义单元类型

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete, 弹出“Element Types”拾取对话框, 单击“Add...”按钮, 弹出“Library of Element Types”对话框。在“Library of Element Types”选项的左列表框中选择“Structural→Solid”, 右列表框中选择“Quad 8node 82”, 在“Element Type reference number”选项的输入栏中输入“1”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

### 2) 退出单元定义

单击“Element Types”对话框上的“Close”按钮, 关闭该对话框。

对应命令流:

```
ET, 1, PLANE82
```

## 4. 定义材料性能参数

### 1) 定义材料

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Material Models, 弹出“Define Material Model Behavior”对话框。

### 2) 设置材料参数

依次单击: Structural→Linear→Elastic→Isotropic, 弹出“Linear Isotropic Properties for Material Number 1”对话框, 在“EX”选项的输入栏中输入“2.1e11”, 在“PRXY”选项的输入栏中输入“0.3”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

### 3) 退出材料设置

在“Define Material Model Behavior”对话框中选择“Material→Exit”(或者直接单击右上角关闭按钮), 关闭该对话框, 退出材料属性设置。

对应命令流:

```
MP, EX, 1, 2.1e11  
MP, PRXY, 1, 0.3
```

## 5. 生成几何模型、划分网格

### 1) 建立矩形面

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Rectangle→By

Dimensions, 弹出“Create Rectangle by Dimensions”对话框, 如图 3-27 所示, 在“X1,X2 X-coordinates”选项的输入栏中分别输入“0”和“0.5”, 在“Y1,Y2 Y-coordinates”选项的输入栏中分别输入“0”和“0.5”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

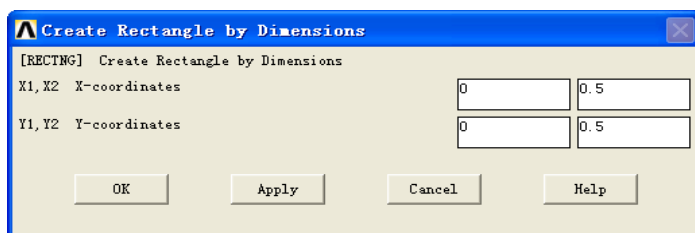


图 3-27 “Create Rectangle by Dimensions”对话框

对应命令流:

```
RECTNG, 0, 0.5, 0, 0.5
```

## 2) 建立圆形面

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Circle→Solid Circle, 弹出“Solid Circular Area”拾取对话框, 如图 3-28 所示, 在“Radius”选项的输入栏中输入“0.2”, 单击“OK”按钮关闭该拾取对话框。

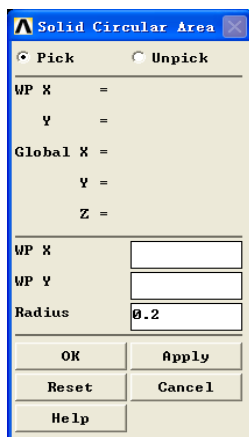


图 3-28 “Solid Circular Area”拾取对话框

对应命令流:

```
PCIRC, 0.2, 0, 0, 360
```

## 3) 进行相减运算

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Subtract→Areas, 弹出“Subtract Areas”拾取对话框, 在其输入栏中输入“1”, 单击“Apply”按钮, 再次弹出“Subtract Areas”拾取对话框, 在其输入栏中输入“2”, 单击“OK”按钮关闭该拾取对话框 (也可在窗口中用鼠标先点取矩形图形, 单击“Apply”按钮, 再单击圆形图形, 最后单击“OK”按钮)。

对应命令流:

ASBA, 1, 2

#### 4) 重新压缩编号

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Numbering Ctrls→Compress Numbers, 弹出“Compress Numbers”对话框, 在“Label Item to be compressed”选项的下拉列表中选择“ALL”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

NUMCMP, ALL

#### 5) 预设网格种子

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Meshing→MeshTool, 弹出“MeshTool”拾取对话框, 如图 3-29 所示。单击 Size Controls→Areas 选项后的“Set”按钮, 弹出“Elem Size at Picked Areas”拾取对话框, 拾取图形窗口中的几何图形, 然后单击“OK”按钮, 弹出“Element Size at picked areas”对话框, 在“Element edge length”选项的输入栏中输入“0.02”。单击“OK”按钮关闭该对话框。

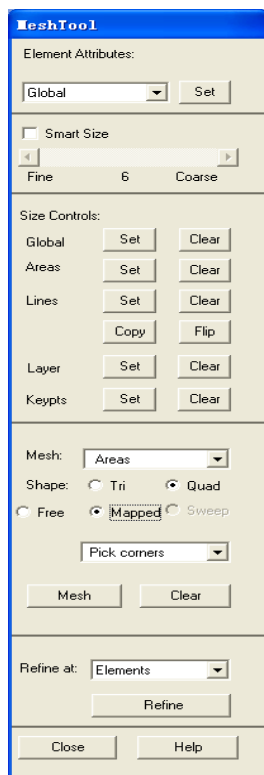


图 3-29 “MeshTool”拾取对话框

对应命令流:

ESIZE,0.02

## 6) 网格划分

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Meshing→MeshTool, 弹出“MeshTool”拾取对话框, 如图 3-29 所示。在“Mesh”选项的下拉列表中选择“Areas”, 在“Shape”选项组中勾选“Quad”和“Mapped”选项的复选框, 然后在其下拉列表中选择“Pick corners”后, 单击“Mesh”按钮, 弹出“Map Mesh Area by Corners”对话框, 用鼠标在图形窗口中单击几何图形, 然后单击“Apply”按钮, 最后在其输入栏中输入“1, 4, 5, 3”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。完成网格划分如图 3-30 所示。

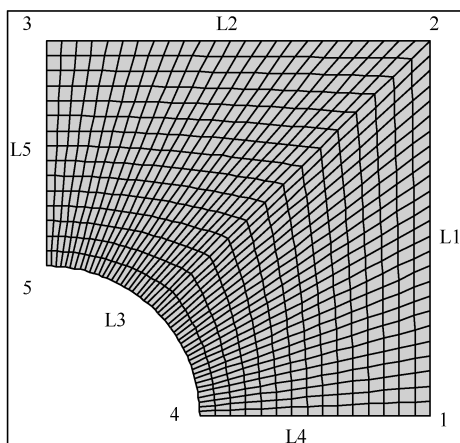


图 3-30 图形显示网格划分结果

对应命令流:

```
AMAP, 1, 1, 4, 5, 3
```

## 6. 加载求解

### 1) 定义求解类型

依次单击: Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis, 弹出“New Analysis”对话框, 选择分析类型为“Static”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
ANTYPE, STATIC
```

### 2) 设置输出结果选项

依次单击: Main Menu→Solution→Analysis Type→Sol'n Controls, 弹出“Solution Controls”对话框, 勾选“Write Items to Results File”选项中“All solution items”(默认选项)的复选框。单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
OUTPR, BASIC, ALL
```

### 3) 施加位移约束

依次单击: Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Lines, 弹出“Apply U,ROT on Nodes”拾取对话框, 在其输入栏中输入“5”(也可在图形窗

口中用鼠标点取编号为 L5 的线段), 单击“OK”按钮, 弹出“Apply U,ROT on Lines”对话框, 选择“UX”选项后单击“Apply”按钮关闭该对话框。再在“Apply U,ROT on Nodes”拾取对话框的输入栏中输入“4”(也可在图形窗口中用鼠标点取编号为 L4 的线段), 单击“OK”按钮, 弹出“Apply U,ROT on Lines”对话框, 选择“UY”选项, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
DL, 5, 1, UX, 0
DL, 4, 1, UY, 0
```

#### 4) 施加均布载荷

依次单击: Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Pressure→On Lines, 弹出“Apply PRES on Lines”拾取对话框, 在其输入栏中输入“1”, 单击“OK”按钮关闭该对话框, 弹出“Apply PRES on Lines”对话框, 在“VALUE Load PRES value”选项的输入栏中输入“-1000”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
SFL, 1, PRES, -1000
```

#### 5) 求解

依次单击: Main Menu→Solution→Solve→Current LS, 弹出“/STATUS Command”文本框及“Solve Current Load Step”对话框, 浏览完毕文本框后单击“File→Close”按钮退出该文本框。单击“Solve Current Load Step”对话框上的“OK”按钮, ANSYS 开始求解计算, 求解完成后, 弹出“Note”对话框, 单击“Close”按钮退出对话框。

对应命令流:

```
SOLVE
FINISH
```

### 7. 进入一般后处理模块, 查看结果

#### 1) 查看变形图

依次单击: Main Menu→General Postproc→Plot Results→Deformed Shape, 弹出“Plot Deformed Shape”对话框, 选择“Def + undeformed”选项, 单击“OK”按钮关闭该对话框。显示 1/4 结构变形图, 保留未变形结构轮廓, 如图 3-31 所示。

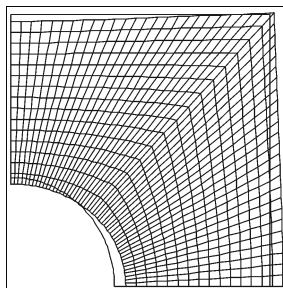


图 3-31 图形显示 1/4 薄板圆孔构件结构变形

对应命令流:

```
PLDISP, 2
```

## 2) 扩展显示

依次单击: Utility Menu → PlotCtrls → Style → Symmetry Expansion → Periodic/Cyclic Symmetry Expansion, 弹出“Periodic/Cyclic Symmetry Expansion”对话框, 选择“1/4 Dihedral Sym”选项, 生成完整的结构变形图, 如图 3-32 所示。

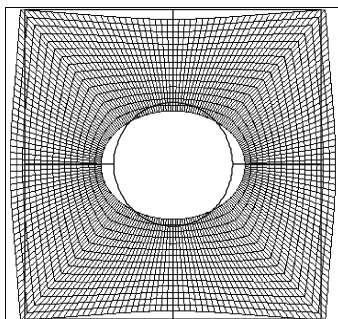


图 3-32 图形显示完整的薄板圆孔构件结构变形

对应命令流:

```
/EXPAND, 4, POLAR, HALF, , 90  
/REPLOT
```

**注意:** 进行扩展显示以后, 后面的其他显示还将以整体结构显示, 要想还原成 1/4 结构显示, 通过 GUI 操作路径: Utility Menu → PlotCtrls → Style → Symmetry Expansion → No Expansion 可以实现。

## 3) 显示结构等效应力云图

依次单击: Main Menu → General Postproc → Plot Results → Contour Plot → Nodal Solu, 弹出“Contour Nodal Solution Data”对话框, 依次单击: Nodal Solution → Stress → von Mises stress, 单击“OK”按钮。显示结构等效应力云图, 如图 3-33 所示。

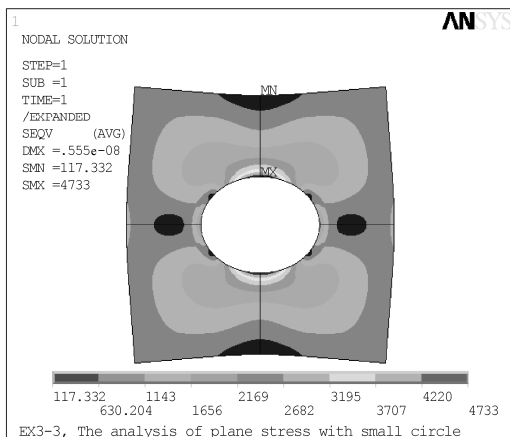


图 3-33 图形显示薄板圆孔构件等效应力云图



对应命令流:

PLNSOL, S, EQV

#### 4) 退出 ANSYS

依次单击: Utility Menu→File→Exit, 弹出“Exit form ANSYS”对话框, 选择“Save Everything”选项, 单击“OK”按钮退出 ANSYS 程序。

### 8. 薄板圆孔构件承载分析完整命令流

FINISH	!退出以前模块
/CLEAR,START	!清除系统中所有数据, 读入启动文件设置
! (1) 建立工作文件名和工作标题	
/FILENAME, EX3-3	!指定当前工程的文件名
/TITLE, The analysis of plane stress with small circle	!定义标题
/UNITS, SI	!采用国际单位制
! (2) 定义单元类型和材料性能参数	
/PREP7	!进入前处理模块
ET, 1, PLANE82	!选择板壳单元
MP, EX, 1, 2.1e11	!输入材料弹性模量
MP, PRXY, 1, 0.3	!输入材料泊松比
! (3) 生成几何模型、划分网格	
RECTNG, 0, 0.5, 0, 0.5	!生成矩形面
PCIRC, 0.2, 0, 0, 360	!生成圆面
ASBA, 1, 2	!矩形面与圆面相减
NUMCMP, ALL	!压缩编号
ESIZE, 0.02	!定义单元划分尺寸
AMAP, 1, 1, 4, 5, 3	!映射划分网格
! (4) 加载求解	
/SOLU	!进入求解模块
ANTYPE, STATIC	!定义结构分析类型为静力分析
OUTPR, BASIC, ALL	!在输出结果中, 列出所有载荷步计算结果
DL, 5, 1, UX, 0	!对 L5 的线施加 X 方向位移约束
DL, 4, 1, UY, 0	!对 L4 的线施加 Y 方向位移约束
SFL, 1, PRES, -1000	!对 L1 的线施加 X 方向均布载荷
SOLVE	!发出求解命令
FINISH	!退出求解模块
! (5) 进入一般后处理模块, 查看结果	
/POST1	!进入一般后处理模块
PLDISP, 2	!显示 1/4 结构变形图, 保留未变形结构轮廓
/EXPAND, 4, POLAR, HALF, , 90	!将 1/4 结构扩展为完整结构
/REPLOT	!显示扩展后的结构模型
PLNSOL, S, EQV	!显示结构等效应力场等值线图
FINISH	!退出后处理模块 POST1

## 3.5 工程实例：龙门起重机主梁静力分析

龙门起重机是一种重要的装卸作业起重设备，广泛应用于码头和生产车间中，它的安全运行对于安全生产的作业效率是非常重要的。在龙门起重机结构的设计过程中，首先考虑的是结构的静强度和刚度，危险工况下应力和位移的分布情况；分析龙门起重机是否满足结构强度和刚度的要求。本节利用有限元对龙门起重机的结构进行强度分析。

### 3.5.1 问题描述

某龙门起重机的实物如图 3-34 所示，金属结构总图如图 3-35 所示，尺寸单位为 mm。主梁板厚为 10mm，主梁材料性能参数为弹性模量为  $2.1 \times 10^5 \text{Mpa}$ ，泊松比为 0.3，密度为  $7.85 \times 10^{-6} \text{kg/mm}^3$ 。载荷位于距跨中心线左右各 2000mm 处的主梁内侧，方向竖直向下，大小为 275 000N。考虑结构自重。



图 3-34 某龙门起重机的实物图

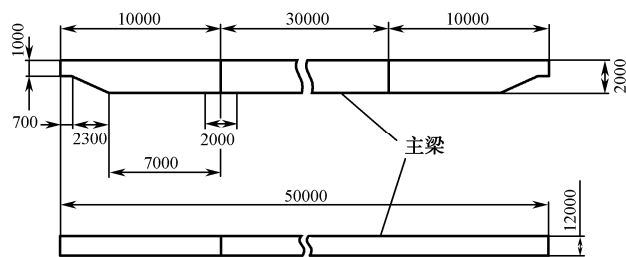


图 3-35 某龙门起重机的金属结构总图

### 3.5.2 问题分析

以龙门起重机的一根主梁为研究对象,因为该主梁关于中心截面对称,故此问题属于面对称问题,选择跨中截面为对称面,建立 1/2 几何模型,通过镜像操作生成完整的几何结构。通过参数定义主梁板厚。选择在主梁与支腿相交面上施加  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  线位移约束,然后选择 SHELL63 板壳单元进行计算求解。

### 3.5.3 求解步骤

#### 1. 建立工作文件名和工作标题

##### 1) 定义工作文件名

依次单击: Utility Menu→File→Change Jobname, 弹出“Change Jobname”对话框。在“[/FILNAM] Enter new jobname”选项的输入栏中输入工作文件名为“EX3-4”, 勾选“New log and error files”选项的“Yes”复选框, 然后单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
/FILENAME,EX3-4
```

##### 2) 定义工作标题

依次单击: Utility Menu→File→Change Title, 弹出“Change Title”对话框, 在“[/TITLE] Enter new title”选项的输入栏中输入“Crane Model”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
/TITLE, Crane Model
```

#### 2. 定义单元类型及实常数

##### 1) 定义单元类型

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete, 弹出“Element Types”拾取对话框。单击“Add...”按钮, 弹出“Library of Element Types”对话框, 在“Library of Element Types”选项的左列表框中选择“Structural→Shell”, 右列表框中选择“Elastic 4node 63”; 在“Element Type reference number”选项的输入栏中输入“1”(默认), 单击“OK”按钮关闭该对话框。单击“Element Types”拾取对话框上的“Close”按钮关闭该拾取对话框。

对应命令流:

```
ET, 1, SHELL63
```

##### 2) 定义参数

依次单击: Utility Menu→Parameters→Scalar Parameters, 弹出“Scalar Parameters”对话框, 在“Selection”选项的输入栏中输入“H=10”, 单击“Accept”按钮。再单击“Close”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
*SET, H, 10
```

### 3) 定义参数

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Real Constants→Add/Edit/Delete, 弹出“Real Constants”拾取对话框, 单击“Add...”按钮, 出现“Element Type for Real Constants”对话框, 单击“OK”按钮, 弹出“Real Constants Set Number 1, for SHELL63”对话框, 如图 3-36 所示。在“Real Constant Set No.”选项的输入栏中输入“1”, 在“Shell thickness at node I TK(I)”, “at node J TK(J)”, “at node K TK(K)”和“at node L TK(L)”选项的输入栏中分别输入“H”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。再单击“Real Constants”对话框上的“Close”按钮。

对应命令流:

```
R, 1, H, H, H, H
```

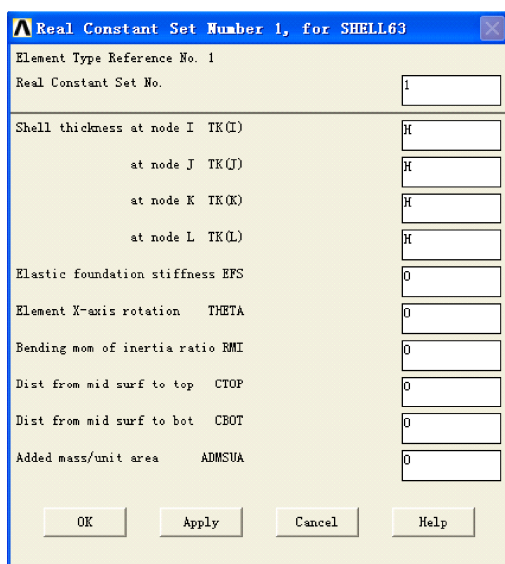


图 3-36 “Real Constants Set Number 1, for SHELL63”对话框

## 3. 定义材料性能参数

### 1) 定义材料

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Material Models, 弹出“Define Material Model Behavior”对话框。

### 2) 设置材料参数

依次单击: Structural→Linear→Elastic→Isotropic, 弹出“Linear Isotropic Properties for Material Number 1”对话框, 如图 3-37 所示。在“EX”选项的输入栏中输入“ $2.1 \times 10^5$ ”, 在“PRXY”选项的输入栏中输入“0.3”。再依次单击: Structural→Density, 弹出“Density for Material

Number 1”对话框,如图 3-38 所示,在“DENS”选项的输入栏中输入“7.85e-6”,单击“OK”按钮关闭该对话框。

### 3) 退出材料设置

在“Define Material Model Behavior”对话框中,依次单击: Material→Exit, 关闭该对话框。

对应命令流:

```
MP, EX, 1, 2.1e5
MP, PRXY, 1, 0.3
MP, DENS, 1, , 7.85e-6
```

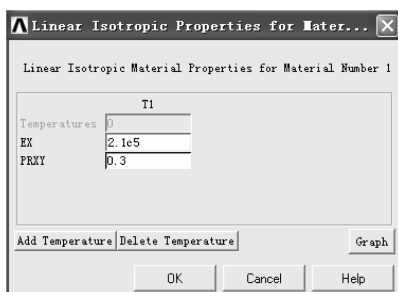


图 3-37 “Linear Isotropic Properties for Material Number 1”对话框

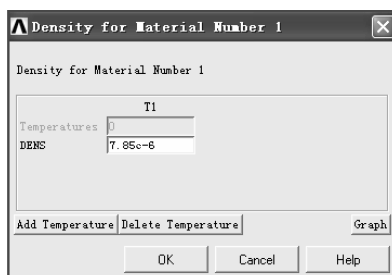


图 3-38 “Density for Material Number 1”对话框

## 4. 生成几何模型、划分网格

### 1) 创建关键点

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→In Active CS, 弹出“Create Keypoints In Active Coordinate System”对话框,在“NPT Keypoint number”选项的输入栏中输入“1”,在“X,Y,Z Location in active CS”选项的输入栏中分别输入“0”,“0”,“0”。单击“Apply”按钮,关键点 1 将出现在 ANSYS 图形窗口中。用同样的方法生成其余关键点,各关键点坐标参见表 3-5。

表 3-5 关键点及坐标

关键点编号	1	2	3	4	5	6
X 坐标	0	14 000	16 000	22 000	24 300	25 000
Y 坐标	0	0	0	0	1000	1000
关键点编号	7	8	9	10	11	12
X 坐标	25 000	24 300	22 000	16 000	14 000	0
Y 坐标	2000	2000	2000	2000	2000	2000

对应命令流:

```
K, 1, 0, 0, 0
K, 2, 14 000, 0, 0
```

```

K, 3, 16 000, 0, 0
K, 4, 22 000, 0, 0
K, 5, 24 300, 1000, 0
K, 6, 25 000, 1000, 0
K, 7, 25 000, 2000, 0
K, 8, 24 300, 2000, 0
K, 9, 22 000, 2000, 0
K, 10, 16 000, 2000, 0
K, 11, 14 000, 2000, 0
K, 12, 0, 2000, 0

```

## 2) 由关键点生成面

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Arbitrary→Through KPs, 弹出“Create Area thru KPs”拾取对话框, 在其输入栏中输入“1,2,11,12”, 单击“Apply”按钮, 再次弹出“Create Area thru KPs”拾取对话框; 继续在其输入栏中输入“2,3,10,11”, 单击“Apply”按钮, 再次弹出“Create Area thru KPs”拾取对话框; 继续在其输入栏中输入“3,4,9,10”, 单击“Apply”按钮, 再次弹出“Create Area thru KPs”拾取对话框; 继续在其输入栏中输入“4,5,8,9”, 单击“Apply”按钮, 再次弹出“Create Area thru KPs”拾取对话框; 继续在其输入栏中输入“5,8,7,6”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

**注意:** 输入栏“1,2,11,12”中的逗号是在英文输入法状态下输入的, 即半角。

对应命令流:

```

A,1,2,11,12
A,2,3,10,11
A,3,4,9,10
A,4,5,8,9
A,5,8,7,6

```

## 3) 平移复制面

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Copy→Areas, 弹出“Copy Areas”拾取对话框, 单击“Pick All”按钮, 弹出“Copy Areas”对话框, 如图 3-39 所示。在“ITIME Number of copies-”选项的输入栏中输入“2”, 在“DZ Z-offset in active CS”选项的输入栏中输入“-1200”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

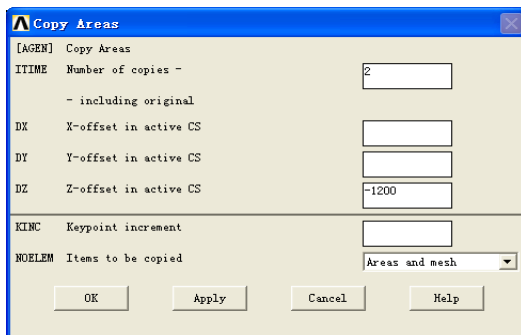


图 3-39 “Copy Areas”对话框

对应命令流:

```
AGEN, 2, ALL, , , , -1200, , , 0
```

#### 4) 由关键点生成面

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Arbitrary→Through KPs, 弹出“Create Area thru KPs”拾取对话框, 在其输入栏中输入“1, 12, 16, 13”, 单击“Apply”按钮, 再次弹出“Create Area thru KPs”拾取对话框; 继续在其输入栏中输入“7, 23, 24, 6”, 单击“Apply”按钮, 再次弹出“Create Area thru KPs”拾取对话框; 继续在其输入栏中输入“6, 24, 21, 5”, 单击“Apply”按钮, 再次弹出“Create Area thru KPs”拾取对话框; 继续在其输入栏中输入“5, 21, 19, 4”, 单击“Apply”按钮, 再次弹出“Create Area thru KPs”拾取对话框; 继续在其输入栏中输入“19, 4, 3, 17”, 单击“Apply”按钮, 再次弹出“Create Area thru KPs”拾取对话框; 继续在其输入栏中输入“17, 3, 2, 14”, 单击“Apply”按钮, 再次弹出“Create Area thru KPs”拾取对话框; 继续在其输入栏中输入“2, 14, 13, 1”, 单击“Apply”按钮, 再次弹出“Create Area thru KPs”拾取对话框; 继续在其输入栏中输入“12, 16, 15, 11”, 单击“Apply”按钮, 再次弹出“Create Area thru KPs”拾取对话框; 继续在其输入栏中输入“15, 11, 10, 18”, 单击“Apply”按钮, 再次弹出“Create Area thru KPs”拾取对话框; 继续在其输入栏中输入“18, 10, 9, 20”, 单击“Apply”按钮, 再次弹出“Create Area thru KPs”拾取对话框; 继续在其输入栏中输入“9, 20, 22, 8”, 单击“Apply”按钮, 再次弹出“Create Area thru KPs”拾取对话框; 继续在其输入栏中输入“8, 22, 23, 7”, 单击“OK”按钮关闭该拾取对话框。

对应命令流:

```
A, 1, 12, 16, 13  
A, 7, 23, 24, 6  
A, 6, 24, 21, 5  
A, 5, 21, 19, 4  
A, 19, 4, 3, 17  
A, 17, 3, 2, 14  
A, 2, 14, 13, 1  
A, 12, 16, 15, 11  
A, 15, 11, 10, 18  
A, 18, 10, 9, 20  
A, 9, 20, 22, 8  
A, 8, 22, 23, 7
```

#### 5) 设置网格划分单元属性

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→Default Attrs, 弹出“Meshing Attributes”对话框, 如图 3-40 所示, 设置好单元属性(默认设置即可)。

对应命令流:

```
TYPE, 1  
MAT, 1  
REAL, 1
```

ESYS, 0  
SECNUM,

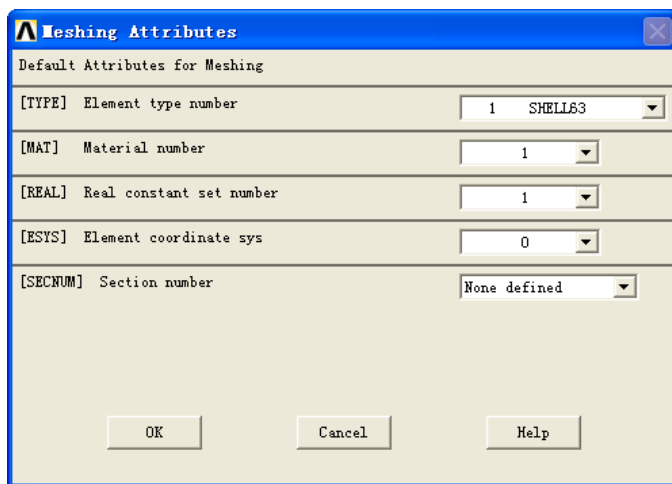


图 3-40 “Meshing Attributes”对话框

#### 6) 预设网格种子

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Lines→All lines, 弹出“Element Sizes on All Selected Lines”对话框, 如图 3-41 所示, 在“SIZE Element edge length”选项的输入栏中输入“400”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

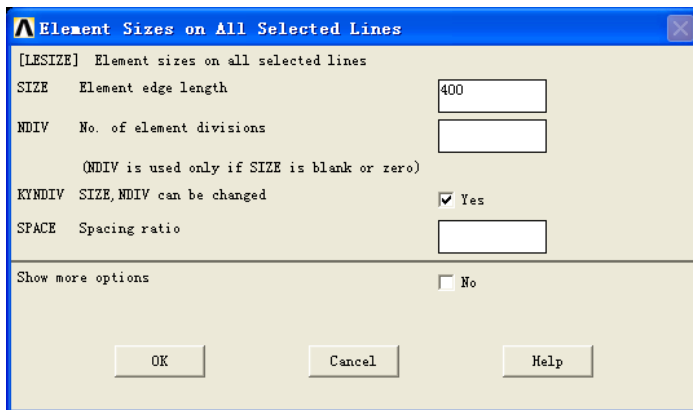


图 3-41 “Element Sizes on All Selected Lines”对话框

对应命令流:

LESIZE, ALL, 400

#### 7) 网格划分

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Areas→Mapped→3 or 4 sided, 弹出“Mesh Areas”拾取对话框, 单击“Pick All”按钮, 自动关闭该拾取对话框。



对应命令流:

```
AMESH, ALL
```

#### 8) 反转面的法线

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Move/Modify→Reverse Normals→of Areas, 弹出“Reverse Area Normals”拾取对话框, 在其输入栏中输入“5, 6, 7, 8, 9, 12, 13, 14, 17, 18, 21, 22”, 单击“OK”按钮, 弹出“Reverse area normals”对话框, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
AREVERSE, 5  
AREVERSE, 6  
AREVERSE, 7  
AREVERSE, 8  
AREVERSE, 9  
AREVERSE, 12  
AREVERSE, 13  
AREVERSE, 14  
AREVERSE, 17  
AREVERSE, 18  
AREVERSE, 21  
AREVERSE, 22
```

#### 9) 以 Y-Z 平面镜像复制

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Reflect→Areas, 弹出“Reflect Areas”拾取对话框, 单击“Pick All”按钮, 弹出“Reflect Areas”对话框, 在“Ncomp Plane of symmetry”选项的下拉列表中选择“Y-Z plane X”, 在“NOELEM Items to be reflected”选项的下拉列表中选择“Areas and mesh”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
ARSYM, X, ALL
```


#### 10) 重新压缩编号

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Numbering Ctrls→Merge Items, 弹出“Merge Coincident or Equivalently Defined Items”对话框, 在“Label Type of item to be merge”选项的下拉列表中选择“ALL”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
NUMMRG, ALL
```

#### 11) 显示有限元模型

依次单击: Utility Menu→Plot→Element, 单击左侧“ (Isometric View)”按钮, 查看主梁有限元模型图, 如图 3-42 所示。

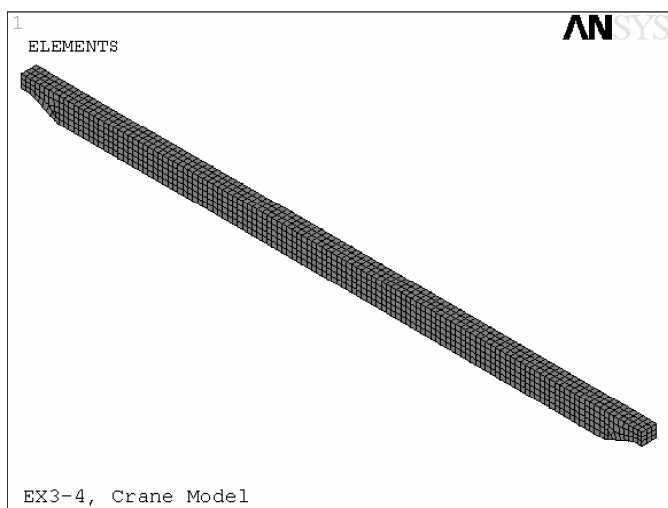


图 3-42 图形显示龙门起重机主梁有限元模型

对应命令流:

```
EPlot
/VIEW,1,1,1,1
/ANG,1
/REP,FAST
```

## 5. 加载求解

### 1) 定义求解类型

依次单击: Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis, 弹出“New Analysis”对话框, 选择分析类型为“Static”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
ANTYPE, STATIC
```

### 2) 设置输出结果选项

依次单击: Main Menu→Solution→Analysis Type→Sol'n Controls, 弹出“Solution Controls”对话框, 勾选“Write Items to Results File”选项的“All solution items”(默认选项)复选框。单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
OUTPR, BASIC, ALL
```

### 3) 施加位移约束

依次单击: Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Areas, 弹出“Apply U,ROT on Areas”拾取对话框, 在其输入栏中输入“38”, 单击“OK”按钮, 弹出“Apply U,ROT on Areas”对话框, 在“Lab2 DOFs to be constrained”选项的下拉列表中选择“All DOF”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

DA, 38, ALL

#### 4) 施加 Y 方向位移约束

依次单击: Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Areas, 弹出“Apply U,ROT on Areas”拾取对话框, 在其输入栏中输入“16”, 单击“OK”按钮, 弹出“Apply U,ROT on Areas”对话框, 在“Lab2 DOFs to be constrained”选项的下拉列表中选择“UY”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

DA, 16, UY

#### 5) 施加集中力载荷

依次单击: Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Force/ Moment→On Nodes, 弹出“Apply F/M on Nodes”拾取对话框, 在其输入栏中输入“72,1086”, 单击“OK”按钮, 弹出“Apply F/M on Nodes”对话框, 如图 3-43 所示。在“Lab Direction of force/mom”选项的下拉列表中选择“FY”, 在“VALUE Force/moment value”选项的输入栏中输入“-275 000”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

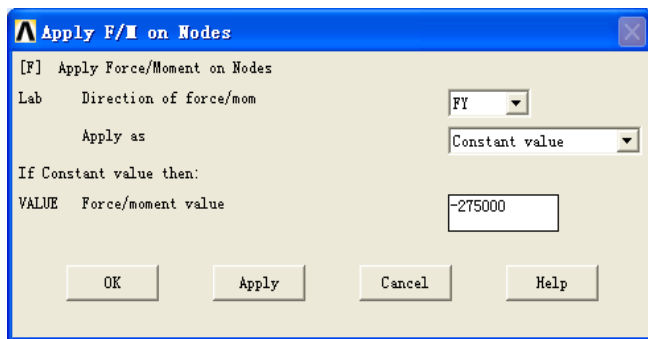


图 3-43 “Apply F/M on Nodes”对话框

对应命令流:

F, 72, FY, -275 000

F, 1086, FY, -275 000

#### 6) 设置重力载荷

依次单击: Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Inerita→Gravity→Global, 弹出“Apply (Gravitational) Acceleration”对话框, 如图 3-44 所示。在“ACELY Global Cartesian Y-comp”选项的输入栏中输入“9.8”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

ACEL, 0, 9.8

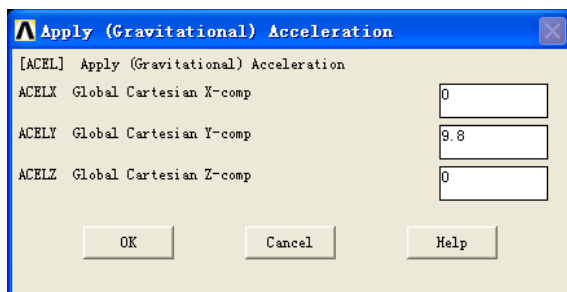


图 3-44 “Apply (Gravitational) Acceleration”对话框

### 7) 求解

依次单击: Main Menu→Solution→Solve→Current LS, 弹出“/STATUS Command”文本框及“Solve Current Load Step”对话框, 浏览完毕文本框后依次单击“File→Close”按钮退出该文本框。单击对话框上的“OK”按钮, ANSYS 开始求解。求解完成后, 弹出“Note”对话框, 单击“Close”按钮退出该对话框。

对应命令流:

```
SOLVE
```

## 6. 进入一般后处理, 查看结果

### 1) 查看变形图

依次单击: Main Menu→General Postproc→Plot Results→Deformed Shape, 弹出“Plot Deformed Shape”对话框, 选择“Def + undef edge”选项, 单击“OK”按钮关闭该对话框。显示结构变形图, 保留未变形结构轮廓, 如图 3-45 所示。



图 3-45 图形显示主梁结构变形

对应命令流:

```
PLDISP, 2
```

### 2) 显示等效应力云图

依次单击: Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu, 弹出“Contour Nodal Solution Data”对话框。再依次单击: Nodal Solution→Stress→von Mises stress, 单击“OK”按钮关闭该对话框。显示主梁结构等效应力云图, 如图 3-46 所示。

对应命令流:

```
PLNSOL, S, EQV
```

### 3) 退出 ANSYS

依次单击: Utility Menu→File→Exit, 弹出“Exit form ANSYS”对话框, 选择“Save Everything”选项, 单击“OK”按钮退出 ANSYS 程序。

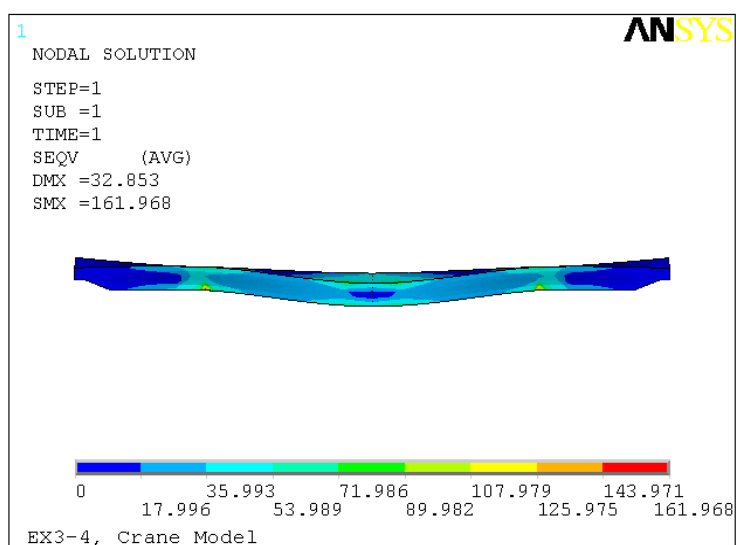


图 3-46 图形显示主梁结构等效应力云图

### 3.5.4 龙门起重机主梁静力分析完整命令流

FINISH	!退出以前模块
/CLEAR,START	!清除系统中所有数据，读入启动文件设置
! (1) 建立工作文件名和工作标题	
/FILENAME,EX3-4	!指定当前工程的文件名
/TITLE, Crane Model	!定义标题
! (2) 定义单元类型及实常数	
/PREP7	!进入前处理模块
ET, 1, SHELL63	!选择 SHELL63 单元
*SET, H,10	!主梁板厚
R, 1, H, H, H, H	!定义实常数
! (3) 定义材料性能参数	
MP, EX, 1, 2.1e5	!输入材料弹性模量
MP, PRXY, 1, 0.3	!输入材料泊松比
MP, DENS, 1, , 7.85e-6	
! (4) 生成几何模型、划分网格	
K, 1, 0, 0, 0	!生成关键点 1，坐标 (0, 0)
K, 2, 14 000, 0, 0	!生成关键点 2，坐标 (14 000, 0)
K, 3, 16 000, 0, 0	!生成关键点 3，坐标 (16 000, 0)
K, 4, 22 000, 0, 0	!生成关键点 4，坐标 (22 000, 0)
K, 5, 24 300, 1000, 0	!生成关键点 5，坐标 (24 300, 1000)
K, 6, 25 000, 1000, 0	!生成关键点 6，坐标 (25 000, 1000)
K, 7, 25 000, 2000, 0	!生成关键点 7，坐标 (25 000, 2000)
K, 8, 24 300, 2000, 0	!生成关键点 8，坐标 (24 300, 2000)

K, 9, 22 000, 2000, 0	!生成关键点 9, 坐标 (22 000, 2000)
K, 10, 16 000, 2000, 0	!生成关键点 10, 坐标(16 000, 2000)
K, 11, 14 000, 2000, 0	!生成关键点 11, 坐标(14 000, 2000)
K, 12, 0, 2000, 0	!生成关键点 12, 坐标(2000, 0)
A, 1, 2, 11, 12	!由关键点 1、2、11 和 12 生成面
A, 2, 3, 10, 11	!由关键点 2、3、10 和 11 生成面
A, 3, 4, 9, 10	!由关键点 3、4、9 和 10 生成面
A, 4, 5, 8, 9	!由关键点 4、5、8 和 9 生成面
A, 5, 8, 7, 6	!由关键点 5、8、7 和 6 生成面
AGEN, 2, ALL, , , , -1200, , , 0	!将所有面沿 X 轴复制到-1200mm
A, 1, 12, 16, 13	!由关键点 1、12、16 和 13 生成面
A, 7, 23, 24, 6	!由关键点 7、23、24 和 6 生成面
A, 6, 24, 21, 5	!由关键点 6、24、21 和 5 生成面
A, 5, 21, 19, 4	!由关键点 5、21、19 和 4 生成面
A, 19, 4, 3, 17	!由关键点 19、4、3 和 17 生成面
A, 17, 3, 2, 14	!由关键点 17、3、2 和 14 生成面
A, 2, 14, 13, 1	!由关键点 2、14、13 和 1 生成面
A, 12, 16, 15, 11	!由关键点 12、16、15 和 11 生成面
A, 15, 11, 10, 18	!由关键点 15、11、10 和 18 生成面
A, 18, 10, 9, 20	!由关键点 18、10、9 和 20 生成面
A, 9, 20, 22, 8	!由关键点 9、20、22 和 8 生成面
A, 8, 22, 23, 7	!由关键点 8、22、23 和 7 生成面
TYPE, 1	
MAT, 1	
REAL, 1	
ESYS, 0	
SECNUM,	
LESIZE, ALL, 400	!设置网格单元尺寸为 400mm
AMESH, ALL	!将所有面用壳单元进行网格划分
AREVERSE, 5	!反转面为 5 的法线
AREVERSE, 6	!反转面为 6 的法线
AREVERSE, 7	!反转面为 7 的法线
AREVERSE, 8	!反转面为 8 的法线
AREVERSE, 9	!反转面为 9 的法线
AREVERSE, 12	!反转面为 12 的法线
AREVERSE, 13	!反转面为 13 的法线
AREVERSE, 14	!反转面为 14 的法线
AREVERSE, 17	!反转面为 17 的法线
AREVERSE, 18	!反转面为 18 的法线
AREVERSE, 21	!反转面为 21 的法线
AREVERSE, 22	!反转面为 22 的法线
ARSYM, X, ALL	!关于 Y-Z 平面进行镜像复制
ALLSEL	!选择所有元素
NUMMRG, ALL	!合并所有元素

EPlot	
/VIEW,1,1,1,1	
/ANG,1	
/REP,FAST	
! (5) 加载求解	
/SOLU	! 进入求解模块
ANTYPE, STATIC	! 定义结构分析类型为静力分析
OUTPR, BASIC, ALL	! 在输出结果中列出所有载荷步计算结果
DA, 38, ALL	! 在编号 38 的面上施加所有方向的位移约束
DA, 16, UY	! 在编号 16 的面上施加 Y 方向的位移约束
F, 72, FY, -275 000	! 在节点 72 施加 Y 方向载荷-275 000
F, 1086, FY, -275 000	! 在节点 1086 施加 Y 方向载荷-275 000
ACEL, 0, 9.8	! 施加重力加速度
SOLVE	! 发出求解命令
FINISH	! 退出求解模块
! (6) 进入一般后处理, 查看结果	
/POST1	! 进入一般后处理模块
PLDISP, 2	! 显示结构变形图, 保留未变形结构轮廓
PLNSOL, S, EQV	! 显示结构等效应力云图
FINISH	! 退出后处理模块 POST1

## 本章小结

本章主要介绍了线性静力分析基本过程, 包括建立几何模型和网格划分, 加载求解, 以及结果分析等。详细介绍了杆系结构、梁结构和板壳结构的定义及在 ANSYS 中常用的单元, 并且分别给出了静力分析实例。在综合实例中, 龙门起重机主梁静力分析则是由多个板壳实体组成的一个工程应用实例。

通过本章的学习, 了解 ANSYS 杆、梁和板壳单元属性的设置。加强对杆、梁和板壳结构的认识。掌握以常用的杆、梁和板壳为单元结构的几何建模、网格划分、加载求解, 以及结果分析的能力。

## 思考题

- (1) 线性静力分析基本过程包括哪几个阶段?
- (2) 对比本章前三个实例, 他们分析步骤中哪些地方是相同的, 哪些地方不同, 区别在哪里?
- (3) LINK1 和 LINK8 杆单元有哪些实常数需要设置?
- (4) BEAM3 和 BEAM4 有哪些实常数需要设置? ANSYS 软件中支持的梁截面形状有哪些呢?

(5) 龙门起重机主梁静力分析实例属于面对称问题，书中给出的是在建模过程中把主梁当做中心截面对称问题，通过镜像对称复制，最后求解完整的主梁。另外，还有一种方法，只对半边主梁建模进行分析，再通过扩张显示出完整主梁分析结果，此时又该如何施加约束和载荷呢？

## 常见疑难问题解析

在本章的实例操作过程中，或者在做其他 ANSYS 练习时可能会遇到的一些问题，结合本章内容汇总如下。

(1) ANSYS 背景颜色可以改变吗？

有时为了打印出来更清楚需要改变一下颜色，可以通过以下界面化操作实现。

GUI 操作路径：Utility Menu→PlotCtrls→Style→Colors→Reverse Video

(2) 为了使显示图形中的文字看上去更清楚，如何改变字体大小？

GUI 操作路径：Utility Menu→PlotCtrls→Font Controls→Legend Font

命令流：

```
/dev, font, 1, Courier*New, 400, 0, -12  
/REPLOT
```

其中，“Courier\*New”为字体样式，如将“-12”变为“-18”即可增大字号。

(3) 绘制变形图时，有时想看变形后的，而有时又同时想看变形前后的，该如何实现？

GUI 操作路径：

Main Menu→General Postproc→Plot Results→Deformed Shape

命令流：

```
PLDISP, KUND  
KUND=0 显示变形后的结构形状  
KUND=1 同时显示变形前和变形后的结构形状  
KUND=1 同时显示变形前和变形后的结构形状，但仅显示结构外观。
```

(4) 显示窗口中左上侧的 SMX 和 SMN，以及结构图中的 MX 和 MN 是什么意思？

SMX、MX 和 SMN、MN 分别代表最大值和最小值，SMX 和 MX 表示 MAX，即最大值；SMN 和 MN 表示 MIN，即最小值。例如，在绘制等效应力云图时，SMX 和 MX 代表最大等效应力，SMN 和 MN 代表最小等效应力；在位移云图中，SMX 和 MX 代表最大位移，SMN 和 MN 代表最小位移。

(5) 如何显示列表反力？

GUI 操作路径：

Main Menu→General Postprocessor→List Results→Reaction Solution...

命令流：

```
PRRSOL
```



由静力平衡可知，在任一方向，反力总和必等于在此方向的载荷总和。

(6) 如何显示单元的内力？

单元的内力包括轴力和弯矩。一般需要单元表操作，通过两个步骤完成，即先定义单元轴力（弯矩）表，再通过列表显示或者图形显示。为了使结果更加直观与形象，通常采用标注数值的云图。具体过程参见人字形屋架的静力分析（显示轴力）和工字截面梁平面弯曲分析（显示弯矩）。

(7) 如何实现以动画的方式模拟结构静力作用下的变形过程？

GUI 操作路径：

Utility Menu → PlotCtrls → Animate → Deformed Shape

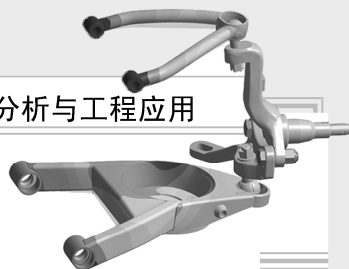
弹出“Animate Mode Shape”对话框中，可以设置各种动画，如位移变形、等效应力云图等。

位移变形动画命令流：

```
PLDI  
ANMODE, 10, 0.5
```

等效应力云图动画命令流：

```
PLNS, S, EQV  
ANMODE, 10, 0.5
```



## 第4章 热学分析



### 知识点

- 热学分析简介及分类
- 稳态热分析
- 瞬态热分析
- 热辐射分析
- 相变热分析
- 热-结构耦合场分析

### 4.1 热学分析简介

热学分析用于计算一个系统或部件的温度分布及其他热物理参数，如热量的获取或损失、热梯度、热流密度（热通量）等。除了单纯的热学分析外，还有一些与热有关的耦合场分析，如热-结构耦合、热-流体耦合、热-电耦合、热-磁耦合、热-电-磁-结构耦合等。

#### 4.1.1 基本传热方式

热传递有 3 种基本类型，分别是热传导、热对流和热辐射。

##### 1. 热传导

热传导可以定义为完全接触的两个物体之间或一个物体的不同部分之间，由于温度梯度而引起的内能交换。热传导遵循傅里叶定律，即

$$q = -k \frac{dT}{dx}$$

式中  $q$  —— 热流密度 ( $\text{W}/\text{m}^2$ );

$k$  —— 导热系数 ( $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ );

$-$  —— 表示热量流向温度降低的方向。

## 2. 热对流

热对流是指固体的表面与它周围接触的流体之间, 由于温差的存在引起的热量交换。热对流可以分为: 自然对流和强制对流两类。热对流用牛顿冷却方程来描述, 即

$$q = h(T_s - T_B)$$

式中  $h$  —— 对流换热系数 (或称膜传热系数、给热系数、膜系数等);

$T_s$  —— 固体表面的温度;

$T_B$  —— 周围流体的温度。

## 3. 热辐射

热辐射指物体发射电磁能, 并被其他物体吸收转变为热的热量交换过程。物体温度越高, 单位时间辐射的热量越多。热传导和热对流都需要有传热介质, 而热辐射无须任何介质。实质上, 在真空中的热辐射效率最高。

在工程中通常考虑两个或两个以上物体之间的热辐射, 系统中每个物体同时辐射并吸收热量。它们之间的净热量传递可以用斯忒藩-玻耳兹曼方程来计算, 即

$$\Phi = \varepsilon \sigma A_1 F_{12} (T_1^4 - T_2^4)$$

式中  $\Phi$  —— 热流量;

$\varepsilon$  —— 辐射率 (黑度);

$\sigma$  —— 斯忒藩-玻耳兹曼常数, 约为  $5.67 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ;

$A_1$  —— 辐射面 1 的面积;

$F_{12}$  —— 由辐射面 1 到辐射面 2 的形状系数;

$T_1$  —— 辐射面 1 的绝对温度;

$T_2$  —— 辐射面 2 的绝对温度。

由该式可以看出, 包含热辐射的热分析是高度非线性的。

### 4.1.2 热学分析的分类

热学分析主要依据分析过程中温度场是否变化而分为两大类。

(1) 稳态热分析, 即温度场不随时间变化。

(2) 瞬态热分析, 即温度场随时间明显变化。

### 4.1.3 热学分析的基本材料属性

与热学分析直接相关的材料属性包括: 热传导率、对流换热系数、辐射系数、焓、比热容、生热率。前 3 种系数的物理意义已在 4.1.1 节中做了介绍, 下面介绍一下后 3 种材料属性。

#### 1. 比热容

比热容是指单位物质升高 (或降低)  $1^\circ\text{C}$  所吸收 (或放出) 的热量, 简称比热。单位为  $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

## 2. 焓

焓是热力学系统中的能量参数。定义式为

$$\text{焓} = \text{热力学能} + \text{压力} \times \text{体积}$$

其在化学热力学中是个非常重要的物理量。

## 3. 生热率

生热率可以通过材料属性和体载荷两种形式来定义。在模拟化学反应生热或电流生热时会用到，单位是单位体积的热流率。

# 4.1.4 热学分析的边界条件

ANSYS 热学分析的边界条件可分为 6 种，即温度、热流率、对流、热流密度、生热率和辐射率。

## 1. 温度

温度可以施加在有限元模型的节点上，也可以施加在实体模型的关键点、线及面上。

## 2. 热流率

热流率是节点集中载荷，可施加在节点和关键点上，主要用于线单元模型。

## 3. 对流

面载荷，适用于计算流体和实体的热交换。可以施加在模型的节点及单元上，也可以施加在实体模型的线及面上。

## 4. 热流密度

面载荷，表示通过单位面积的热流率。正值表示热流流入单元，反之，则表示热流流出单元。可施加在有限元模型的节点或单元上，也可施加在实体模型的线或面上。

## 5. 生热率

生热率可以通过材料属性和体载荷两种形式来定义。可施加在有限元模型的节点或单元上，也可施加在实体模型的关键点、线、面和体上。

## 6. 辐射率

面载荷，施加在实体的外表面上，可施加在有限元模型的节点或单元上，也可施加在实体的线或面上。

4.1.5 热学分析参数符号和单元

1. 热学分析所用参数符号

热学分析所用参数符号，参见表 4-1。

表 4-1 热学分析所用参数符号

项 目	国 际 单 位	英 制 单 位	ANSYS 代号
长度	m	ft	
时间	s	s	
质量	kg	Lb	
温度	K	°F	
力	N	lbf	
能量（热量）	J	Btu	
功率（热流率）	W	Btu/h	
热流密度	W/m <sup>2</sup>	Btu/h•ft <sup>2</sup>	
生热速率	W/m <sup>3</sup>	Btu/h•ft <sup>3</sup>	
导热系数	W/m•K	Btu/h•ft•°F	KXX
对流系数	W/m <sup>2</sup> •K	Btu/h•ft <sup>2</sup> •°F	HF
密度	kg/m <sup>3</sup>	lbm/ft <sup>3</sup>	DENS
比热	J/kg•K	Btu/lbm•°F	C
焓	J	Btu/ft <sup>3</sup>	ENTH

2. 热学分析单元

Plane35 —— 2 维 6 节点三角形单元，与 Pane77 单元兼容，适用于不规则模型。适用于 2 维稳态和瞬态热分析，包括热-结构耦合分析，可用于平面单元或轴对称单元。

Plane55 —— 2 维热单元，可用于平面或轴对称单元使用，4 节点。可模拟通过多孔介质的非线性稳态流动。

Plane75 —— 4 节点轴对称谐分析单元，是 Plane55 单元轴对称型的一般形式，可施加非轴对称载荷。

Plane77 —— 8 节点 2 维单元，Plane55 单元的高阶形式。

Plane78 —— 8 节点轴对称谐分析单元，Plane77 单元型的一般形式。

Solid70 —— 3 维热实体单元，可用于 3 维的稳态或瞬态热分析。

Solid87 —— 10 节点 3 维四面体实体单元，可用于 3 维的稳态或瞬态热分析。

Solid90 —— 20 节点 3 维实体单元，是 Solid70 单元的高阶形式。

Link31 —— 辐射线单元，用于模拟空间两点间辐射热流率的单轴单元，可用于 2 维（平

面或轴对称) 或 3 维的稳态和瞬态热分析。

Link32 —— 2 维传导杆, 两节点间的热传导单轴单元。

Link33 —— 3 维传导杆, 两节点间的热传导单轴单元。

Link34 —— 对流线单元, 两节点间的热对流单轴单元。

Infin9 —— 2 维无限边界, 模拟 2 维无界问题的开放边界。2 节点, 每个节点带有磁矢量或温度自由度。

Infin47 —— 3 维无限边界, 模拟 3 维无界问题的开放边界。4 节点四边形或 3 节点三角形, 每个节点带有磁矢量或温度自由度。

Infin110 —— 2 维无限实体, 模拟 2 维、边界开放的极大场问题。

Infin111 —— 3 维无限实体, 模拟 3 维、边界开放的极大场问题。

Mass71 —— 热质量单元, 模拟内部无明显的温度梯度, 且有热容但忽略内部热阻的物体。

Shell57 —— 热壳单元, 3 维具有内导热能力的单元。

Shell131 —— 4 节点热壳单元, 3 维具有面内和厚度方向导热能力的单元。

Shell132 —— 8 节点热壳单元, 3 维具有面内和厚度方向导热能力的单元。

Plane13 —— 2 维耦合场单元, 具有 2 维磁场、温度场、电场和结构场之间有限耦合的功能。

Solid5 —— 3 维耦合场单元, 具有 3 维磁场、温度场、电场和结构场之间有限耦合的功能。

## 4.2 稳态热分析

在工程上, 很多的设备在长时间的运行过程中处于稳态传热过程, 需要进行稳态热分析来了解系统运行参数, 以及设备安全情况。

### 4.2.1 稳态热分析概述

ANSYS 热分析基于能量守恒原理的热平衡方程, 用于有限元法计算各节点的温度, 并导出其他热物理参数。在稳态传热过程中, 系统的温度场不随时间变化。稳态传热用于分析稳定的热载荷对于系统或部件的影响。通常在进行瞬态热分析之前进行稳态热分析, 用于确定初始温度分布, 稳态热分析可以通过有限元计算确定由于稳定的热载荷引起的温度、热梯度、热流率、热流密度等参数。

### 4.2.2 实例分析: 实心圆柱体的稳态热传导过程分析

#### 1. 问题描述

现有一实心圆柱体, 已知其直径为 50cm, 高为 35cm, 具体的形状示意图如图 4-1 所示。

在其侧面现施加一个大小为  $150^{\circ}\text{C}$  的均匀温度载荷，而圆柱体上、下端面的温度均为  $0^{\circ}\text{C}$ ，柱体材料的热传导系数为  $40\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，在不考虑圆柱体和外界发生热交换的情况下，请描述实心圆柱体内部的温度场分布情况。

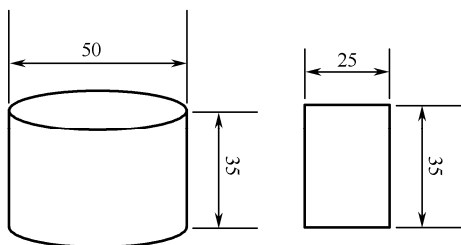


图 4-1 实心圆柱体及横截面示意图

对于本题，由于不考虑圆柱体与外界的热交换，因此，可以把问题定性为稳态热传导问题。由于圆柱体具有轴对称性，因此选择圆柱体纵截面的一半来建立平面有限元模型，并选择相应的平面热分析单元（Plane55）来建立单元进行求解。

## 2. 定义工作文件名和工作标题

### 1) 定义工作文件名

依次单击：Utility Menu→File→Change Jobname，弹出“Change Jobname”对话框，如图 4-2 所示，在“[/FILNAM]Enter new jobname”输入栏中输入工作文件名为“EXER 4-1”，勾选“New log and error files?”选项的复选框，设置为“Yes”，然后单击“OK”按钮。

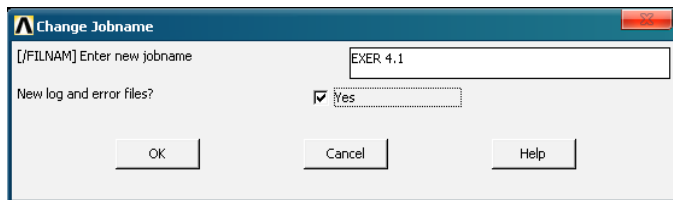


图 4-2 “Change Jobname”对话框

对应命令流：

```
/FILNAME,EXER 4-1
```

### 2) 定义工作标题

依次单击：Utility Menu→File→Change Title，弹出“Change Title”对话框，如图 4-3 所示，在“[/TITLE]Enter new title”选项的输入栏中输入标题为“SOLID CYLINDER SOLUTION”，然后单击“OK”按钮。

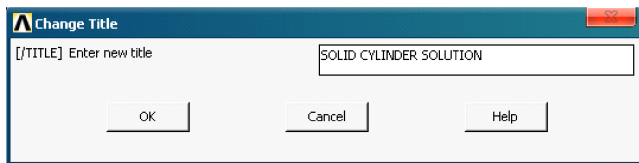


图 4-3 “Change Title”对话框

对应命令流:

```
/TITLE, SOLID CYLINDER SOLUTION
```

### 3) 定义图形用户界面

依次单击: Main→Preferences, 弹出“Preferences for GUI Filtering”对话框, 如图 4-4 所示, 勾选“Individual discipline(s) to show in the GUI”选项组中的“Thermal”选项的复选框, 单击“OK”按钮。

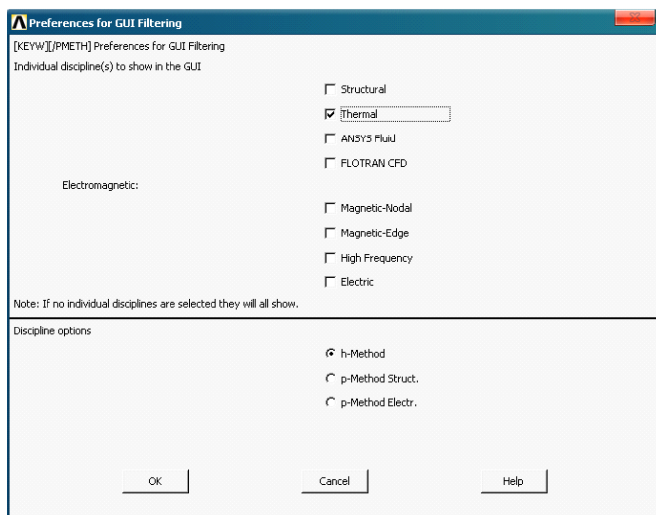


图 4-4 “Preferences for GUI Filtering”对话框

对应命令流:

```
KEYW,PR_THERM,1
```

## 3. 定义单元类型及材料属性

### 1) 定义单元类型

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add→Edit→Delete, 弹出“Element Types”拾取对话框, 单击“Add”按钮, 弹出“Library of Element Types”对话框, 如图 4-5 所示。在“Library of Element Types”选项的左右两个列表中分别选择“Thermal Mass→Solid”和“Quad 4node 55”, 在“Element type reference number”选项的输入栏中输入“1”, 然后单击“OK”按钮。

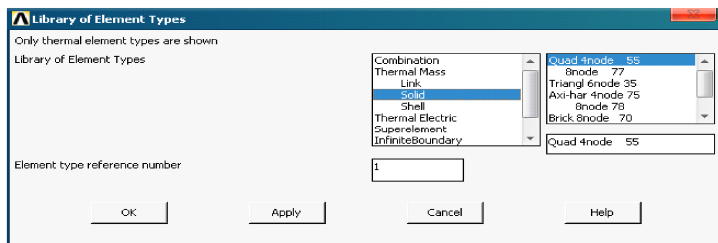


图 4-5 “Library of Element Types”对话框



对应命令流:

ET,1,PLANE 55

## 2) 定义单元选项

单击“Element Type”拾取对话框中“Option”按钮,弹出“PLANE55 element type options”对话框,如图 4-6 所示。在“Element behavior K3”选项的下拉列表中选择“Axisymmetric”,单击“OK”按钮弹出新的对话框,再单击“Close”按钮,关闭该对话框。

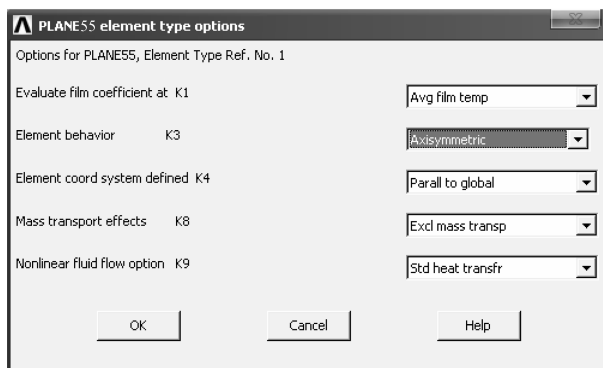


图 4-6 “PLANE55 element type options”对话框

对应命令流:

KEYOPT,1,3,1

## 3) 设置材料属性

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models, 弹出“Define Material Models Behavior”窗口,如图 4-7 所示。依次单击: Material Model Available→Thermal→Conductivity→Isotropic, 弹出“Conductivity for Material Number 1”对话框,如图 4-8 所示,在“KXX”选项的输入栏中输入圆柱体的导热系数为“40”,然后单击“OK”按钮。再依次单击: Material→Exit, 退出材料属性的设置。

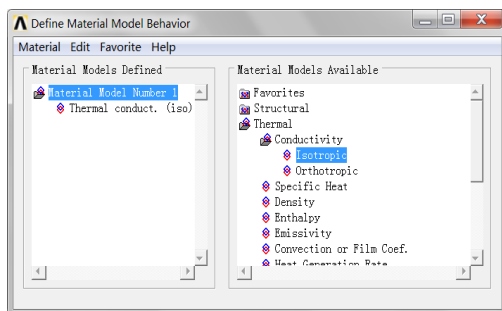


图 4-7 “Define Material Model Behavior”窗口

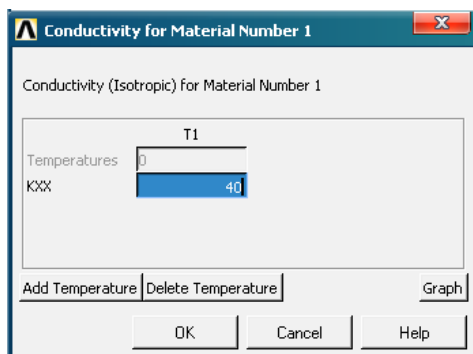


图 4-8 “Conductivity for Material Number 1”对话框

对应命令流:

```
MP,KXX,1,40
```

#### 4. 建立几何模型

##### 1) 创建关键点

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→In Active CS, 弹出“Create Keypoints in Active Coordinate System”对话框, 如图 4-9 所示, 在“NPT Keypoint number”选项的输入栏中输入关键点编号为“1”, 在“X,Y,Z Location in active CS”选项的输入栏中分别输入关键点坐标“0”, “0”, “0”, 然后单击“OK”按钮。参考以上的操作, 依次创建以下几个关键点: 2 (0.25, 0, 0), 3 (0.25, 0.35, 0) 和 4 (0, 0.35, 0)。

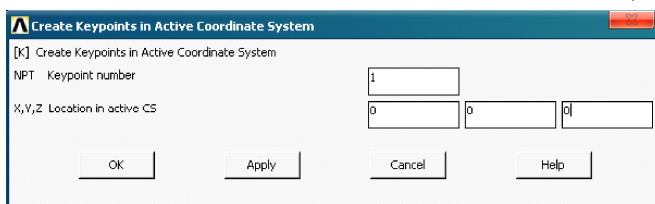


图 4-9 “Create Keypoints in Active Coordinate System”对话框

对应命令流:

```
K,1,0,0,0
K,2,0.25,0,0
K,3,0.25,0.35,0
K,4,0,0.35,0
```

##### 2) 打开线编号控制

依次单击: Utility Menu→Plotctrls→Numbering, 弹出“Plot Numbering Controls”对话框, 如图 4-10 所示, 勾选“LINE Line numbers”选项的复选框, 设置为“On”, 然后单击“OK”按钮。

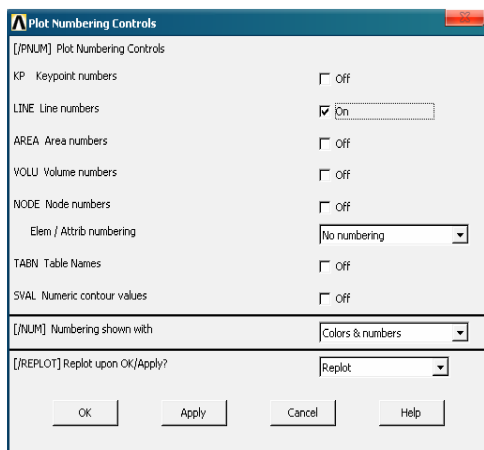


图 4-10 “Plot Numbering Controls”对话框

对应命令流:

```
/PNUM,LINE,1
```

### 3) 生成线

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→Straight Line, 弹出“Create Straight Line”拾取对话框, 如图 4-11 所示。在其输入栏中输入“1,2”, 然后单击“Apply”按钮, 再次弹出“Create Straight Line”拾取对话框; 在其输入栏中输入“2,3”, 然后再次单击“Apply”按钮, 再次弹出“Create Straight Line”拾取对话框; 在其输入栏中输入“3,4”, 然后再次单击“Apply”按钮, 再次弹出“Create Straight Line”拾取对话框; 在其输入栏中输入“4,1”, 然后单击“OK”按钮。

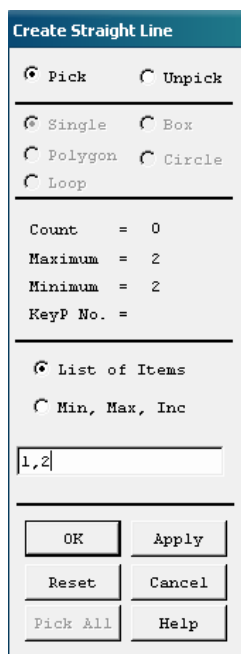


图 4-11 “Create Straight Line”拾取对话框

对应命令流:

```
LSTR,1,2  
LSTR,2,3  
LSTR,3,4  
LSTR,4,1
```

### 4) 生成面

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→By Lines, 弹出“Create Area by 1”拾取对话框, 在输入栏中输入“1,2,3,4”, 单击“OK”按钮。

对应命令流:

```
AL,ALL
```

### 5) 显示面

依次单击: Utility Menu→Plot→Areas, 生成结果如图 4-12 所示。

对应命令流:

APLOT

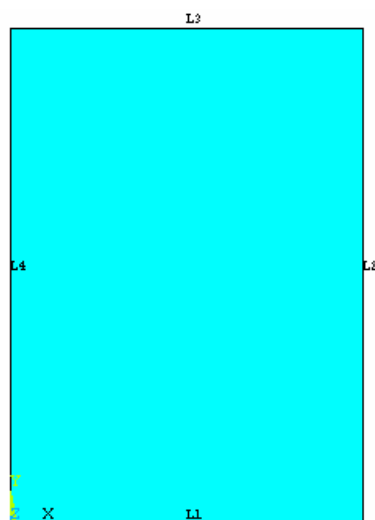


图 4-12 图形显示结果

## 5. 有限元网格划分

### 1) 显示线

依次单击: Utility Menu→Plot→Lines。

对应命令流:

LPLOT

### 2) 选择线段并设置线段等分数

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→Manualsize→Lines→Picked lines, 弹出“Element Sizes on Picked Lines”拾取对话框, 在其输入栏中输入“1,3”, 然后单击“OK”按钮, 弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框, 如图 4-13 所示。在“NDIV No. of element divisions”选项的输入栏中输入“30”, 单击“Apply”按钮; 再次弹出“Element Sizes on Picked Lines”拾取对话框, 在其输入栏中输入“2,4”, 单击“OK”按钮, 再次弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框, 在“NDIV No. of element divisions”选项的输入栏中输入“60”, 然后单击“OK”按钮。

对应命令流:

```
LSEL,S,,,1,3,2
LESIZE,ALL,,,30
LSEL,S,,,2,4,2
LESIZE,ALL,,,60
```

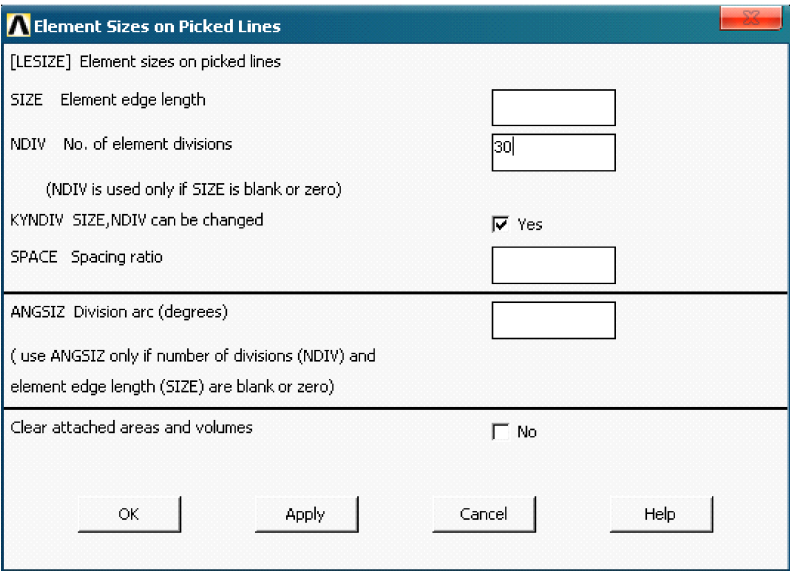


图 4-13 “Element Sizes on Picked Lines” 对话框

3) 划分自由网格

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Area→Free, 弹出 “Mesh Area” 拾取对话框, 在其输入栏中输入 “1”, 然后单击 “OK” 按钮, 生成的网格划分结果如图 4-14 所示。

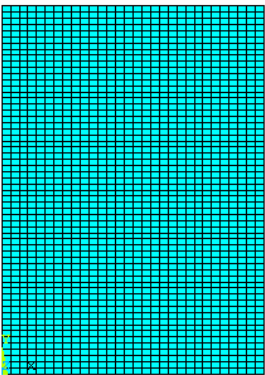


图 4-14 图形显示网格划分后的结果

对应命令流:

AMESH,1

4) 保存网格划分结果

依次单击: Utility Menu→File→Save As, 弹出 “Save Database” 对话框, 在 “Save Database to” 选项的下拉列表中选择 “EXER 4.11.db”, 然后单击 “OK” 按钮。

## 6. 施加载荷并求解

### 1) 定义分析类型

依次单击: Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis, 弹出“New Analysis”对话框, 如图 4-15 所示, 在 “[ANTYPE] Type of analysis” 选项组中勾选 “Steady-State” 选项的复选框, 单击 “OK” 按钮。

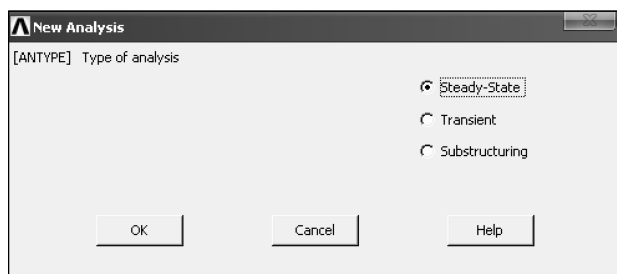


图 4-15 “New Analysis”对话框

对应命令流:

```
ANTYPE,STATIC
```

### 2) 选择线 L1 及 L3

依次单击: Utility Menu→Select→Entities, 弹出“Select Entities”拾取对话框, 如图 4-16 所示, 在上面两个下拉列表中分别选择 “Lines” 和 “By Num/Pick”, 勾选 “From Full” 选项的复选框, 然后单击 “OK” 按钮, 弹出 “Select Lines” 拾取对话框, 如图 4-17 所示, 在其输入栏输入 “1,3”, 然后单击 “OK” 按钮。

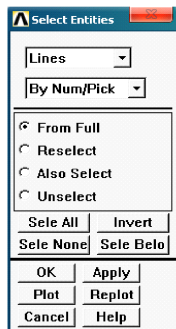


图 4-16 “Select Entities”拾取对话框

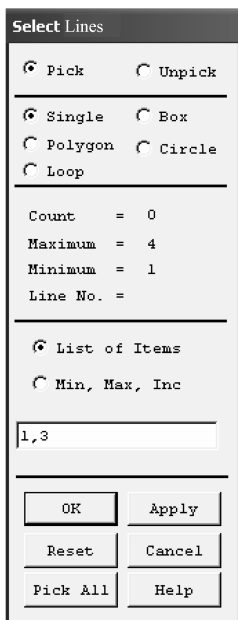


图 4-17 “Select Lines”拾取对话框

对应命令流:

```
LSEL,S,,,1,3
```

### 3) 选择所选线上的所有节点

依次单击: Utility Menu→Select→Entities, 弹出“Select Entities”拾取对话框, 如图 4-18 所示, 在上面两个下拉列表中分别选择“Nodes”和“Attached to”, 勾选“Lines,all”选项的复选框, 然后单击“OK”按钮。

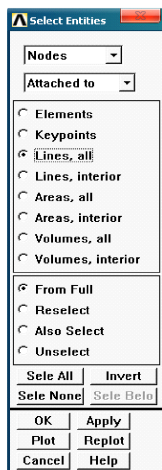


图 4-18 “Select Entities”拾取对话框

对应命令流:

```
NSLL,S,1
```

### 4) 在节点上施加温度载荷

依次单击: Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Thermal→Temperature→On Nodes, 弹出“Apply TEMP on Nodes”拾取对话框, 单击“Pick All”按钮, 弹出“Apply TEMP on Nodes”对话框, 如图 4-19 所示, 在“Lab2 DOFs to be constrained”选项组中选择“TEMP”选项, 在“VALUE Load TEMP value”选项的输入栏中输入“0”, 然后单击“OK”按钮。

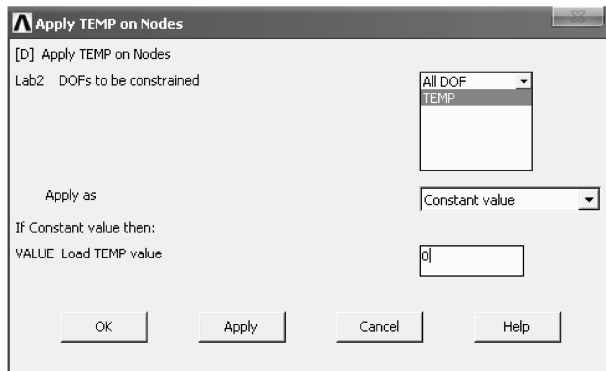


图 4-19 “Apply TEMP on Nodes”对话框

对应命令流:

```
D,ALL,TEMP, 0
```

5) 选择全部

依次单击: Utility Menu→Select→Everything。

对应命令流:

```
ALLSEL
```

**注意:**“执行完选择操作后,再执行选择全部”这个习惯非常重要。

6) 选择线 L2

依次单击: Utility Menu→Select→Entities, 弹出“Select Entities”拾取对话框, 在上面两个下拉列表中分别选择“Lines”和“By Num/Pick”, 勾选“From Full”选项的复选框, 然后单击“OK”按钮, 弹出“Select Lines”拾取对话框, 在其输入栏中输入“2”, 然后单击“OK”按钮。

对应命令流:

```
LSEL,S,,,2
```

7) 选择所选线上的所有节点

依次单击: Utility Menu→Select→Entities, 弹出“Select Entities”拾取对话框, 在上面两个下拉列表中分别选择“Nodes”和“Attached to”, 勾选“Lines all”选项的复选框, 然后单击“OK”按钮。

对应命令流:

```
NSLL,S,1
```

8) 在节点上施加温度载荷

依次单击: Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Thermal→Temperature→On Nodes, 弹出“Apply TEMP on Nodes”拾取对话框, 单击“Pick All”按钮, 弹出“Apply TEMP on Nodes”对话框, 在“Lab2 DOFs to be constrained”选项组中选择“TEMP”选项, 在“VALUE Load TEMP value”选项的输入栏中输入“150”, 然后单击“OK”按钮。

对应命令流:

```
D,ALL,TEMP,150
```

9) 选择全部

依次单击: Utility Menu→Select→Everything。

对应命令流:

```
ALLSEL
```

10) 求解

依次单击: Main Menu→Solution→Solve→Current LS, 弹出“Solve Current Load Step”对话框, 单击“OK”按钮开始求解, 当弹出“Solution is done”对话框时表示求解完成, 单击“Close”按钮关闭该对话框。



对应命令流:

SOLVE

#### 11) 保存求解结果

依次单击: Utility Menu→File→Save As, 弹出“Save Database”对话框, 在“Save Database to”选项的下拉列表中选择“EXER 4.12.db”, 然后单击“OK”按钮。

### 7. 进入一般后处理, 查看结果

依次单击: Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu, 弹出“Contour Nodal Solution Data”对话框, 如图 4-20 所示。再依次单击: Nodal Solution→DOF Solution→Nodal Temperature, 然后单击“OK”按钮, 窗口显示出温度场等值线图, 如图 4-21 所示。

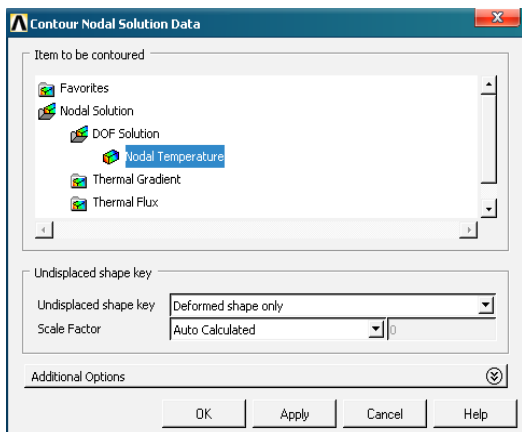


图 4-20 “Contour Nodal Solution Data”对话框

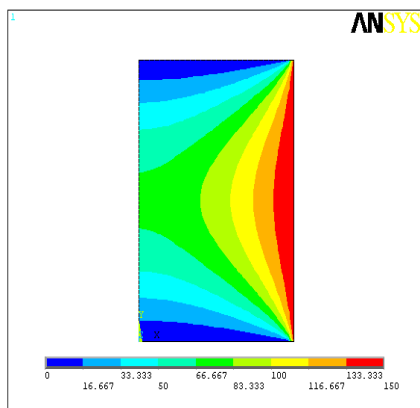


图 4-21 图形显示温度场等值线

对应命令流:

```
/POST1  
PLNSOL,TEMP  
FINISH
```

## 4.2.3 实心圆柱体的稳态热传导过程分析完整命令流

```
FINISH  
/CLEAR, START  
! (1) 定义工作文件名和工作标题  
/FILENAME, EXER4-1  
/TITLE, SOLID CYLINDER SOLUTION  
! (2) 定义单元类型  
/PREP7  
KEYW, PR_THERM, 1
```

```
!退出以前模块  
!清除系统中数据, 读入启动文件设置  
  
!定义当前工程的工作文件名  
!定义标题  
  
!进入前处理模块
```

```

! (3) 定义材料属性
ET,1,PLANE 55
KEYOPT,1,3,1
MP,KXX,1,40
! (4) 建立几何模型、有限元网格划分
K,1,0,0,0
K,2,0.25,0,0
k,3,0.25,0.35,0
k,4,0,0.35,0
LSTR,1,2
LSTR,2,3
LSTR,3,4
LSTR,4,1
/PNUM,LINE,1
AL,ALL
LPLOT
LSEL,S,,,1,3,2
LESIZE,ALL,,,30
LSEL,S,,,2,4,2
LESIZE,ALL,,,60
AMESH,1
FINISH
! (5) 施加载荷并求解
/SOLU
ANTYPE,STATIC
LSEL,S,,,1,3
NSLL,S,1
D,ALL,TEMP
LSEL,S,,,2
NSLL,S,1
D,ALL,TEMP,150
ALLSEL
SOLVE
FINISH
! (6) 进入一般后处理, 查看结果
/POST1
PLNSOL,TEMP
FINISH

```

!选择热分析单元  
!定义其轴对称性  
!输入热传导系数

!生成关键点 1, 2, 3, 4

!连接各关键点生成线  
!显示线编号  
!通过线生成面  
!显示线  
!选择编号为 1, 3 的直线  
!将选择的直线划分成 30 等份  
!选择编号为 2, 4 的直线  
!将选择的直线划分成 60 等份  
!进行映射网格划分  
!退出前处理模块

!进入求解模块  
!定义分析类型为稳态热分析  
!选择编号为 1, 3 的直线  
!选择已选直线上的点  
!在已选的节点上施加温度为 0℃的载荷  
!选择编号为 2 的直线  
!选择已选直线上的点  
!在已选的节点上施加温度为 150℃的载荷  
!选择所有单元  
!求解  
!退出求解模块

!进入后处理模块  
!显示温度场等值线图  
!退出后处理模块

## 4.3 瞬态热分析

瞬态热分析用于计算一个系统的随时间变化的温度场及其他热参数。在工程上一般用瞬

态热分析计算温度场，并将之作为热载荷进行应力分析。许多的传热应用，以及热处理问题都需要用到瞬态热分析，如喷管，压力容器，引擎堵塞等。

### 4.3.1 瞬态热分析概述

瞬态热分析的基本步骤与稳态热分析类似，主要的区别是瞬态热分析中的载荷是随时间变化的。为了表达随时间变化的载荷，必须将载荷-时间曲线分为载荷步。载荷-时间曲线中的每一个拐点为一个载荷步，如图 4-22 所示。

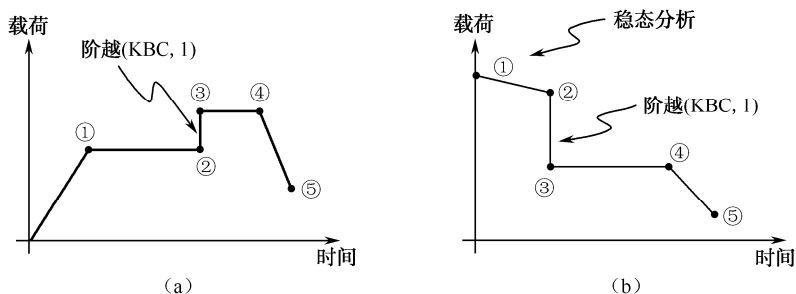


图 4-22 载荷-时间曲线

对于每一个载荷步，必须定义载荷值及时间值，同时必须选择载荷步为渐变或阶越。

### 4.3.2 实例分析：平板对接焊过程模拟

#### 1. 问题描述

如图 4-23 所示的平板对接焊示意图，考虑到结构的对称性，取其 1/2 进行分析。利用生死单元方法模拟焊接的过程。平板长度为 0.1m，厚度为 0.05m，V 字形焊缝的角度为  $60^\circ$ ，焊接速度为  $0.02 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，焊接电流 180A，焊接电压 150V，焊接热效率为 0.75。焊接使用高斯热源，求焊接过程中的温度场分布和冷却后的温度场分布。

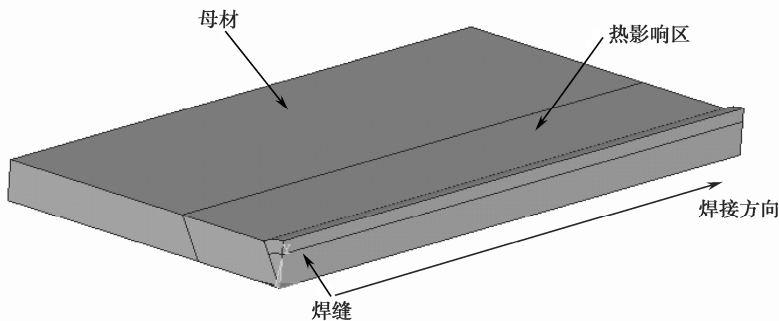


图 4-23 平板对接焊示意图

## 2. 定义工作文件名和工作标题

### 1) 定义工作文件名

依次单击: Utility Menu→File→Change Jobname, 弹出“Change Jobname”对话框, 在“[/FILNAM] Enter new jobname”选项的输入栏中输入工作文件名“EX4-2”, 勾选“New log and error files?”选项的复选框, 设置为“Yes”, 然后单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
FILNAME, EX4-2
```

### 2) 定义工作标题

依次单击: Utility Menu→File→Change Title, 弹出“Change Title”对话框, 在“[/TITLE] Enter new title”选项的输入栏中输入标题为“3D\_weld\_analysis”, 然后单击“OK”按钮。

对应命令流: TITLE, 3D\_weld\_analysis

### 3) 定义单位制

在命令栏输入栏中输入“/UNITS, SI”, 采用国际单位制。

对应命令流:

```
/UNITS, SI
```

## 3. 定义焊接尺寸和焊接参数

依次单击: Utility Menu→Parameters→Scalar Parameters, 弹出“Scalar Parameters”对话框, 在“Selection”选项的输入栏中分别输入: LEN = 100e-3 (焊接母材长度), WID = 50e-3 (宽度), THIC = 6e-3 (厚度), WWELD = 15e-3 (焊接热影响区的宽度), 沿着焊缝长度方向划分的单元数目 LNUM = 10, 焊接电流  $I = 180$ , 焊接电压  $U = 150$ , 焊接速度  $V = 0.02$ , 焊缝坡口角度 ARF = 60, 圆周率  $PI = 3.1415926$ , 焊接热效率  $ETA = 0.75$ , 热流集中程度系数  $K = 1.2e4$  环境温度及母材初始温度  $THEM0 = 25$ , 热源中心温度  $QMAX = 0.24 \times K \times eta \times I \times U / PI$ , 有效热半径  $RADIUS = 0.0071$ 。GAUSS 热源模型  $QR = QMAX \times \exp(-K \times R \times R)$  (单位:  $W/m^2$ )。假设热源中心坐标为  $(a, b, c)$ ,  $a = 0$ ,  $b =$  每个焊缝的最高点的坐标  $y$ ,  $c = vdt$ 。每个焊缝上表面任一点的坐标为  $(x, y, z)$ ,  $x > 0$ ,  $y > 0$ ,  $z > 0$ 。每个焊缝上表面任一点距热源中心距离  $r^2 = x^2 + (y-b)^2 + (z-c)^2$ 。

对应命令流:

```
LEN = 100e-3
WID = 50e-3
THIC = 6e-3
WWELD = 15e-3
LNUM = 10
I = 180
U = 150
V = 0.02
ARF = 60
```

PI = 3.1415926  
ETA = 0.75  
K = 1.2e4  
THEM0 = 25  
QMAX = 0.24\*K\*ETA\*I\*U/PI  
PERCENT = 0.99  
RADIUS = 0.0071

4. 定义单元类型

依次单击：Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add→Edit→Delete，弹出“Element Types”拾取对话框。单击“Add...”按钮，弹出“Library of Element Types”对话框，在“Library of Element Types”选项的左列表框中选择“Ela Conduction”选项，在其右列表框中选择“Scalar Brick 5”选项，在“Element type reference number”选项的输入栏中输入“1”（默认），然后单击“OK”按钮关闭该对话框。单击“Element Types”拾取对话框中的“Close”按钮。

对应命令流：

ET,1,SOLID5

5. 定义材料参数

材料参数参见表 4-2，依次单击：Main Menu→Preprocessor→Material Models，弹出“Define Material Model Behavior”对话框。依次单击：Material Models Available→Thermal，分别定义命令流中描述的温度下对应的密度（Density）、热导系数（Conductivity Isotropic）和相变潜热时的比热容（Specific Heat Capacity）。

表 4-2 材料参数

温度℃	0	100	200	300	400	500	1200	1250	1350
密度(kg/m³)	7820	7800	7800	7800	7800	7800	7800	7800	7800
热导系数(W/(m·K))	52	50.7	48.6	46.1	42.3	38.9	30	30	30
比热容(J/(kg·K))	450	469	481	508.5	536	569	700	2172	5116
温度℃	1400	1450	1500	1505	1705	1905	2105	2305	2500
密度(kg/m³)	7800	7800	7800	7800	7800	7800	7800	7800	7800
热导系数(W/(m·K))	30	30	30	30	30	30	30	30	30
比热容(J/(kg·K))	6589	8061	9533	9533	7757	5982	4206	2431	700

设置材料密度如图 4-24 所示，单击“Add Temperature”按钮添加温度，在相应的温度下输入相应的密度。热传导系数、比热容的设置方法类似。

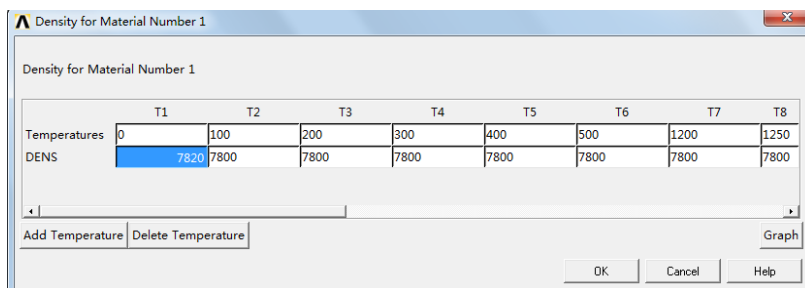


图 4-24 设置材料密度

对应命令流:

```
MPTEMP,1,0,100,200,300,400,500
MPTEMP,,1200,1250,1350,1400,1450,1500
Mptemp,,1505,1705,1905,2105,2305,2500
MPDATA,DENS,1,1,7820,7800,7800,7800,7800,7800
MPDATA,DENS,1,,7800,7800,7800,7800,7800,7800
MPDATA,DENS,1,,7800,7800,7800,7800,7800,7800
MPDATA,KXX,1,1,52,50.7,48.6,46.1,42.3,38.9
MPDATA,KXX,1,,30,30,30,30,30,30
MPDATA,KXX,1,,30,30,30,30,30,30
MPDATA,C,1,1,450,469,481,508.5,536,569
MPDATA,C,1,,700,2172,5116,6589,8061,9533
MPDATA,C,1,,9533,7757,5982,4206,2431,700
```

## 6. 建立几何模型

使用由下而上的建模方式，即沿着关键点-线-体的顺序进行建模。

### 1) 建立关键点

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→in Active CS, 弹出“Create Keypoints in Active Coordinate System”对话框, 在“NPT Keypoint number”选项的输入栏中输入“1”, 在“X,Y,Z Location in active CS”选项的输入栏中分别输入“0”, “0”, “0”, 其余关键点按照下面命令流中的描述依次进行输入。

打开节点编号和单元编号显示控制。依次单击: Utility Menu→PlotCtrls→Numbering, 弹出“Plot Numbering Controls”对话框, 勾选“KP Keypoint numbers”选项的复选框, 使其设置为“ON”; 勾选“NODE Node numbers”选项的复选框, 使其设置为“ON”; 勾选“LINE Line numbers”选项的复选框, 使其设置为“ON”; 在“Elem→Attrib numbering”选项的下拉列表中选择“Element numbers”, 单击“OK”按钮。

### 2) 由点生成面

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Create→Areass→Arbitrarily→Through KPs, 弹出“Create Area thru KPs”拾取对话框。在图形窗口中, 拾取关键点 1、3、4 和 6, 单击“OK”按钮生成面后关闭该对话框。按照同样的方法拾取关键点 1、2、5 和 6 生成面。

### 3) 生成焊缝实体的面

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Circle→Partial Annulus, 弹出“Part Annular Circ Area”对话框。在“Rad-1”选项的输入栏中输入“ $\text{thic}/\cos(\text{arf}/2)$ ”, 在“Theta-1”选项的输入栏中输入“arf”, 在“Theta-2”选项的输入栏中输入“90”, 单击“OK”按钮, 生成一个面。同理, 再分别在“Rad-1”选项的输入栏中输入“ $\text{thic}/\cos(\text{arf}/2) * \sqrt{2}/2$ ”, 在“Theta-1”选项的输入栏中输入“arf”, 在“Theta-2”选项的输入栏中输入“90”, 单击“OK”按钮生成另外一个面, 如图 4-25 所示。

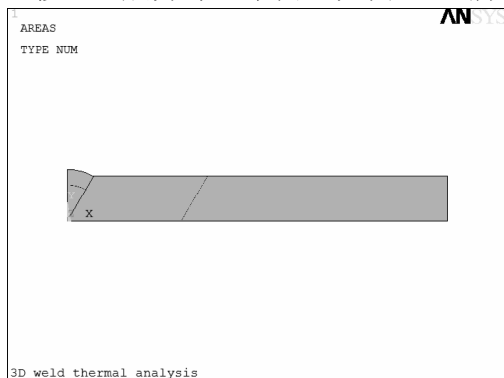


图 4-25 图形显示生成焊缝实体的面

### 4) 由面拖拉成实体

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→In Active Coord, 弹出“Lines in Active Coord”拾取对话框, 单击关键点 1 和 7 生成路径。沿着路径拖拉, 依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Extrude→Areas→Along Lines, 弹出“Sweep Areas along Lines”对话框, 先选择所有面, 再选择拖拉路径。对所有实体进行分割, 依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Partition→Volumes, 弹出“Partition Volumes”对话框, 单击“Pick All”按钮。再将所有的体黏结在一起, 依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Glue→Volumes, 弹出“Glue Volumes”对话框, 单击“Pick All”按钮。生成实体模型如图 4-26 所示。

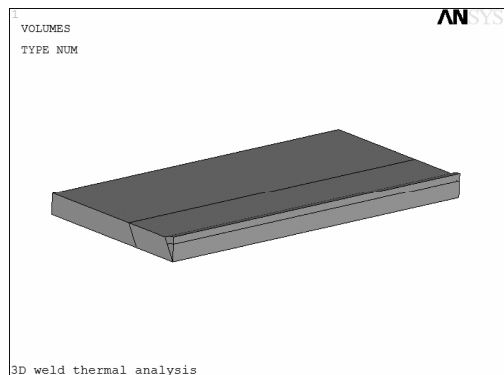


图 4-26 图形显示实体模型

对应命令流:

```
*AFUN,DEG          !如果涉及角度，将使用“度”（系统默认是弧度）
K,1,0,0,0
K,2,WWELD,0,0
K,3,WID,0,0
K,4,WID,THIC,0
K,5,THIC*TAN(ARF/2)+WWELD,THIC,0
K,6,THIC*TAN(ARF/2),THIC,0
K,7,0,0,LEN
A,1,3,4,6
A,1,2,5,6
CYL4,0,0,THIC/COS(ARF/2),ARF,0,90
CYL4,0,0,THIC/COS(ARF/2)*SQRT(2)/2,ARF,0,90
L,1,7
VDRAG,ALL,,,,,,,,14
VPTN,ALL
VGLUE,ALL
NUMMRG,ALL
```

## 7. 划分网格

使用映射网格划法，首先将面 24 和 32 用布尔运算相加，依次单击：Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Add→Areas。再将线 40 和 49 连成一条线，依次单击：Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Volumes→Mapped→Concatenate→Lines。按照同样的方式处理线 42 和 52。设置单元尺寸，沿焊缝  $z$  向单元尺寸为 0.002，母材  $y$  方向单元尺寸为 0.001，焊缝  $y$  方向单元尺寸为 0.0015，沿  $x$  方向单元尺寸为 0.001。参照命令流对实体进行网格划分，生成的有限元网格如图 4-27 所示，网格划分完成后储存为“db”文件。

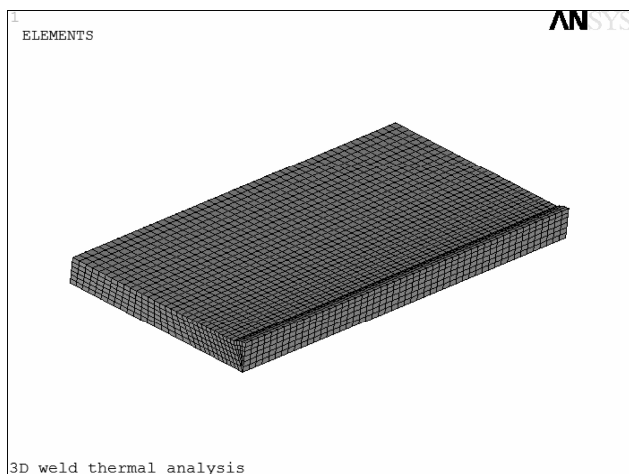


图 4-27 图形显示有限元网格



对应命令流:

```
AADD,24,32
LCCAT,40,49
LCCAT,42,52
LSEL,S,LINE,,17,21,2
LSEL,A,LINE,,24,26,2
LSEL,A,LINE,,35,36
LSEL,A,LINE,,14,30,16
LESIZE,ALL,2e-3
LSEL,S,LINE,,6,25,19
LSEL,A,LINE,,2,18,16
LESIZE,ALL,,,6
LSEL,S,LINE,,41,43,2
LSEL,A,LINE,,50,53,3
LESIZE,ALL,1.5e-3
LSEL,S,LINE,,45,47,2
LSEL,A,LINE,,44,46,2
LESIZE,ALL,,,18,0.8
LSEL,S,LINE,,7,27,20
LESIZE,ALL,,,12,0.7
LSEL,A,LINE,,5,23,18
LESIZE,ALL,,,12,10/7
LSEL,S,LINE,,11,34,23
LSEL,A,LINE,,48,51,3
LESIZE,ALL,,,4
ALLS
MSHKEY,1
MSHAPE,0,3D
VSEL,ALL
VATT,,,1
ASLV,S
AATT,,,1
TYPE,1
VMESH,ALL
```

## 8. 加载求解

### 1) 约束条件

对面 23 和 25 施加对称面约束,依次单击: Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→Symmetry B.C.→On Areas。约束面 6 个自由度,依次单击: Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Areas。

对应命令流:

```
/SOLU
```

```

DA,33,SYMM
DA,25,SYMM
DA,6,UX,0
DA,6,UY,0
DA,6,UZ,0
DA,6,ROTX,0
DA,6,ROTY,0
DA,6,ROTZ,0

```

2) 获得单元最大编号和最小编号  
对应命令流:

```

A1=31
ESEL,S,TYPE,,1
*GET,NEMAX,ELEM,,NUM,MAX
*GET,NEMIN,ELEM,,NUM,MIN

```

3) 设置非线性求解选项和载荷步参数

定义分析类型为瞬态分析, 使用完全牛顿-拉普森方法, 激活自适应下降(默认), 打开大变形选项等, 具体操作参见命令流。

对应命令流:

```

ALLSEL
ANTYPE,TRANS
TRNOPT,FULL
NROPT,FULL,,ON
NLGEOM,ON
PRED,ON
TIMINT,ON
TINTP,0.005,,,1,0.5,0.2
TREF,25
T=0
DT0 = 1e-6
DT1 = 0.5
TINC = LEN/(LNUM*V)

```

4) 确定初始温度场

使用稳态分析确定初始温度场, 求解完成后储存为“db”文件, 具体操作参见命令流。

对应命令流:

```

TIME,DT0
TIMINT,OFF
KBC,1
ESEL,S,LIVE
NSLE,S
IC,ALL,TEMP,25

```

```
ALLS
OUTRES,NSOL,ALL
SOLVE
```

### 5) 模拟焊缝焊接过程

首先选取焊缝上表面单元。焊接过程使用循环实现，每个循环内先确定热源的位置，然后判断在热源有效半径内的单元，并施加相应的单元表面热载荷，计算完成后在下一个循环开始之前删除这些高斯热源载荷，将计算结果作为下一个循环的初值。由于涉及循环嵌套，使用 GUI 操作路径比较麻烦，本例中给出了相应的命令流。具体操作和载荷步设置参见命令流。

对应命令流：

```
ESEL,S,TYPE,,1
*DO,IM,0,LNUM,1
ASEL,S,,,A1
NSLA,R,1
ESLN,R,0
C=V*TINC*IM
B=THIC/COS(ARF/2)
TM=DT1+IM*TINC
TIME,TM
ANTYPE,4,REST
TIMINT,ON
AUTOTS,ON
KBC,1
DELTIM,0.01,0.01,0.2
*DO,I,NEMIN,NEMAX,1
*IF,ESEL(I),EQ,1,THEN
XSY=CENTRX(I)
YSY=CENTRY(I)
ZSY=CENTRZ(I)
RR=ABS(SQRT(XSY*XSY+(YSY-B)*(YSY-B)+(ZSY-C)*(ZSY-C)))
*IF,RR,LE,RADIUS,THEN
QR=QMAX*EXP(-K*RR*RR)
SFE,I,NMFACE(I),HFLUX,,QR
*ENDIF
*ENDIF
*ENDDO
ALLSEL
OUTRES,NSOL,ALL
SOLVE
ESEL,S,TYPE,,1
ASEL,S,,,A1
NSLA,R,1
```

```

ESLN,R,0
*DO,I,1,6
SFEDELE,ALL,I,HFLUX
*ENDDO
*ENDDO
ALLS
ESEL,S,LIVE
EPLOT
SAVE,'1.11thermal_analysAvaila','DB'

```

## 6) 焊接完成后冷却过程

焊接完成后，设置 100 个时间步，对结构进行冷却计算。

对应的命令流：

```

ALLSEL
TIME,TM+100
DDELE,ALL,TEMP
ANTYPE,4,REST
TIMINT,ON
AUTOTS,ON
KBC,1
DELTIM,0.01,0.01,0.2
SOLVE

```

## 9. 后处理

### 1) 进入一般后处理，查看结果

依次单击：Main Menu→General Postproc→Read Results→By Pick，弹出“Results File”对话框，可以选择用户读入的时间点的求解结果，如图 4-28 所示。

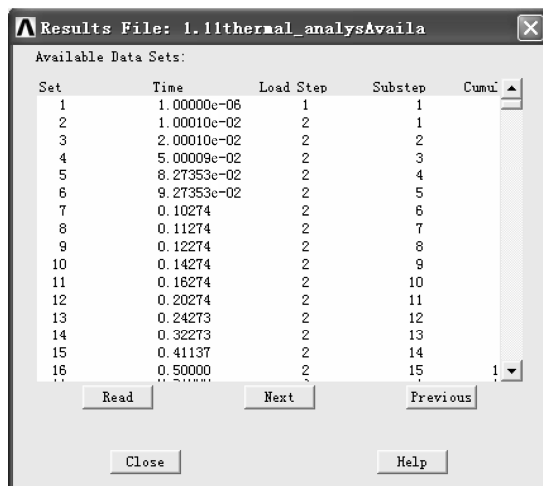


图 4-28 “Results File” 对话框

在显示焊接过程节点温度分布图的对话框中选择读入的时间点为“1.5”，单击“Read”按钮。依次单击：Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu，弹出“Item to be contoured”对话框，在“DOF Solution”选项的下拉列表中选择“Nodal Temperature”，显示节点温度。再选择读入的时间点分别为“2.5”、“3.5”和“5”，按照上面的操作得到焊接过程温度的分布如图 4-29 所示。

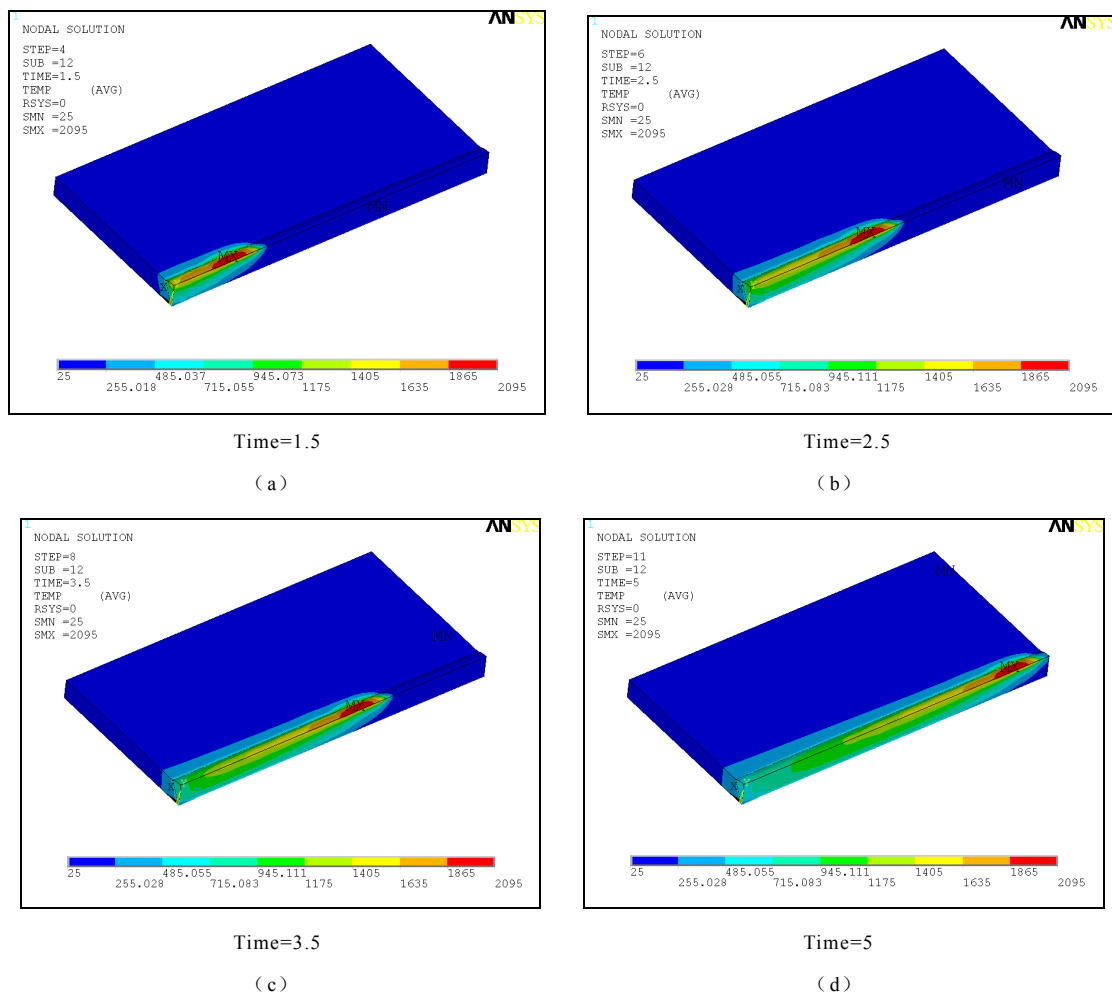


图 4-29 图形显示焊接过程温度场分布

显示冷却过程温度场分布如图 4-30 所示，冷却 100 时间步后，构件的最大温度为 144℃，最低温度为 140℃。

## 2) 进入时间历程后处理查看结果

查看焊缝节点在焊接过程中的温度曲线变化。首先设置时间历程变量，依次单击：Main Menu→TimeHist Postpro→Define Variables，弹出“Defined Time-History Variables”对话框，单击“Add”按钮，接受“Nodal DOF Result”选项的默认设置，出现“Define Nodal Data”拾取对话框，用键盘输入或鼠标拾取编号为 7877 的节点，单击“OK”按钮，弹出“Define Nodal Data”

对话框，在“User-specified label”选项的输入栏中输入“TEMP 7877”，在其右边的下拉列表中选择“TEMP”，单击“OK”按钮，完成变量的定义。依次单击：Main Menu→TimeHist Postpro→Graph Variables，弹出“Graph Time-History Variables”对话框，在“NVAR1”选项的输入栏中输入变量编号为2，单击“OK”按钮，显示节点 7877 温度随时间变化的曲线，如图 4-31 所示。

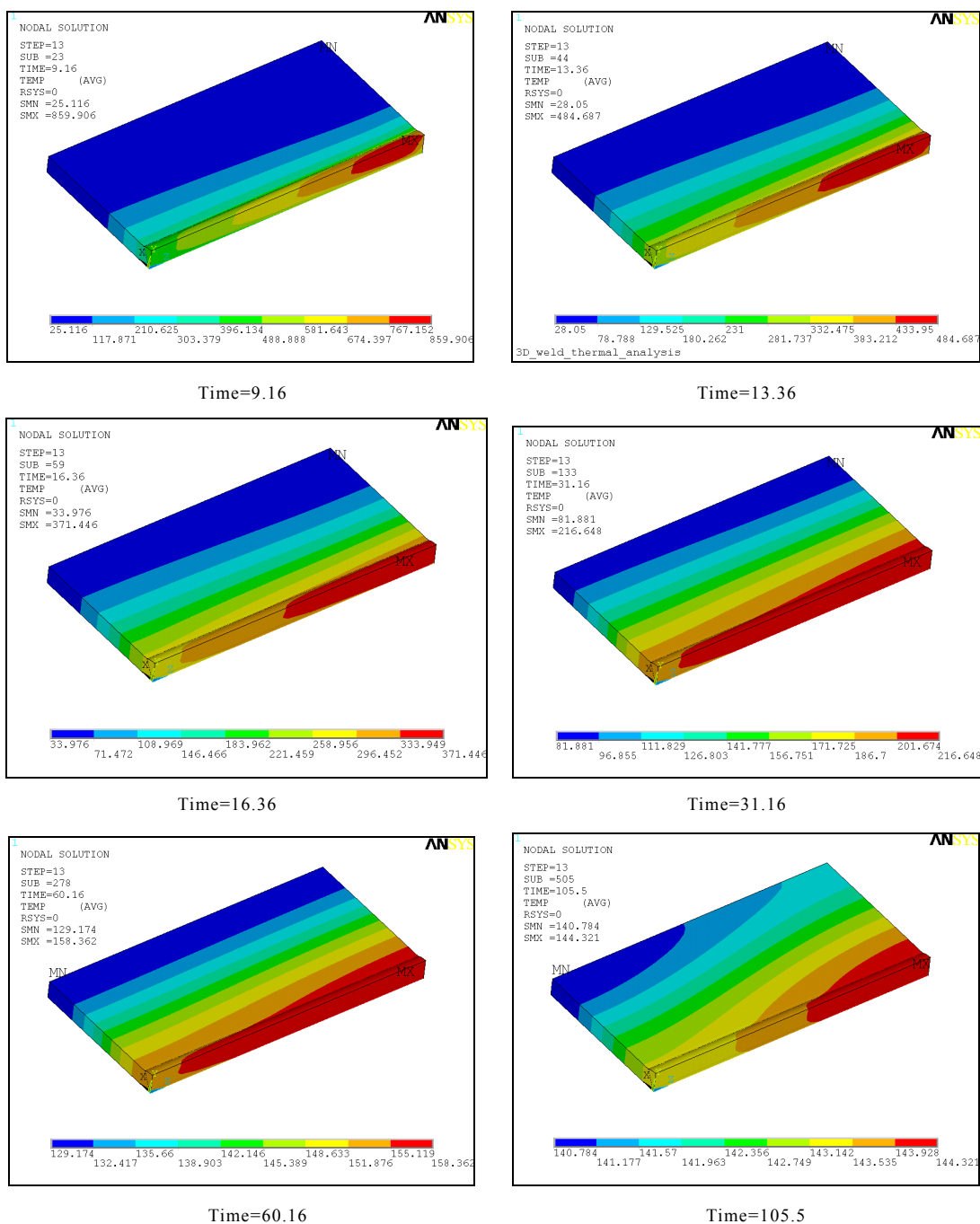


图 4-30 图形显示冷却过程温度场分布

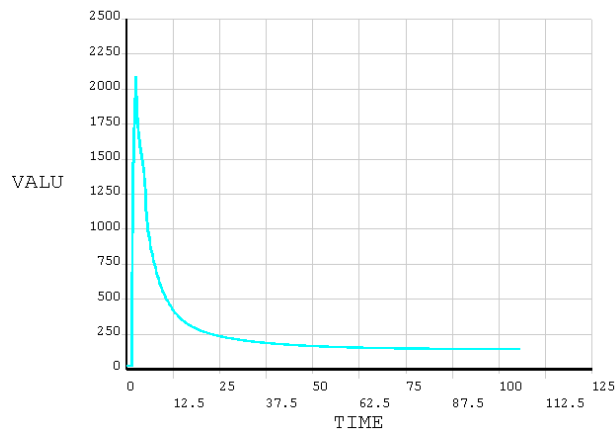


图 4-31 图形显示节点 7877 温度随时间变化的曲线

### 4.3.3 平板对接焊过程模拟完整命令流

```

FINISH                                !退出以前模块
/CLEAR, START                         !清除系统中数据, 读入启动文件设置
! (1) 定义工作文件名和工作标题
/FILNAME, EX4-2
/TITLE, 3D_weld_analysis
/UNITS, SI                            !定义国际制单位
/PREP7
! (2) 定义焊接尺寸和焊接参数
LEN=100e-3                           !长 0.1m
WID=50e-3                             !宽 0.05m
THIC=6e-3                             !厚 0.006m
!B=0.002                             !根部预留(m)
!H=0                                  !钝边(m)
WWELD=15e-3                           !焊接热影响区宽度
LNUM=10                               !沿焊缝长度方向划分份数
!*****焊接参数*****
I=180                                 !焊接电流(A)
U=150                                 !焊接电压(V)
V=0.02                                !焊接速度(m/s)
ARF=60                                !焊缝坡口角度(°)
PI=3.1415926                          !PI 为圆周率
ETA=0.75                              !焊接热效率, 手工电弧焊 0.7, 埋弧焊 0.8
K=1.2e4                               !热流集中程度系数
THEM0=25                              !环境温度及母材初始温度, 取室温为 25℃
!*****定义高斯表面移动热源参数*****
!GAUSS 热源模型  $QR=QMAX*\exp(-K*R*R)$  (单位  $W/m^2$ )

```

```

!假设热源中心坐标为(A,B,C), A=0, B=每个焊缝的最高点的坐标 Y, C=V * DT
!每个焊缝上表面任一点的坐标为(X,Y,Z), X>0, Y>0, Z>0
!R^2=X^2+(Y-B)^2+(Z-C)^2, 每个焊缝上表面任意一点距热源中心的距离
QMAX=0.24*K*ETA*I*U/PI          !加热斑点中心热流(W/m^2)
RADIUS=0.0071                    !有效热半径, 单位为 m

! (3) 定义单元类型及材料参数
ET,1,SOLID5                      !计算单元类型
MPTEMP,1,0,100,200,300,400,500  !定义材料属性温度范围
MPTEMP,,1200,1250,1350,1400,1450,1500  !定义材料属性温度范围
MPTEMP,,1505,1705,1905,2105,2305,2500  !定义材料属性温度范围

MPDATA,DENS,1,1,7820,7800,7800,7800,7800,7800  !定义材料密度(kg/m^3)
MPDATA,DENS,1,,7800,7800,7800,7800,7800,7800  !定义材料密度(kg/m^3)
MPDATA,DENS,1,,7800,7800,7800,7800,7800,7800  !定义材料密度(kg/m^3)

MPDATA,KXX,1,1,52,50.7,48.6,46.1,42.3,38.9      !热传导系数(W/(m * K))
MPDATA,KXX,1,,30,30,30,30,30,30                !热传导系数(W/(m * K))
MPDATA,KXX,1,,30,30,30,30,30,30                !热传导系数(W/(m * K))
MPDATA,C,1,1,450,469,481,508.5,536,569          !考虑相变潜热的比热容(J/kg * K)
MPDATA,C,1,,700,2172,5116,6589,8061,9533        !考虑相变潜热的比热容(J/kg * K)
MPDATA,C,1,,9533,7757,5982,4206,2431,700        !考虑相变潜热的比热容(J/kg * K)

! (4) 建立几何模型、划分网格
*AFUN,DEG                                     !如果涉及角度, 将使用“度”(系统默认是弧度)

K,1,0,0,0                                     !生成关键点
K,2,WWELD,0,0
K,3,WID,0,0
K,4,WID,THIC,0
K,5,THIC*TAN(ARF/2)+WWELD,THIC,0
K,6,THIC*TAN(ARF/2),THIC,0
K,7,0,0,LEN

A,1,3,4,6                                     !由关键点生成面
A,1,2,5,6
CYL4,0,0,THIC/COS(ARF/2),ARF,0,90            !生成部分圆面
CYL4,0,0,THIC/COS(ARF/2)*SQRT(2)/2,ARF,0,90

L,1,7                                         !形成拖拉路径 L14
VDRAG,ALL,,,,,14                            !沿线拖拉面
VPTN,ALL                                     !分割体
VGLUE,ALL                                    !粘贴体
NUMMRG,ALL

AADD,24,32                                  !面相加, 以便生成映射网格
LCCAT,40,49                                 !将两个线段合成一个
LCCAT,42,52                                 !沿焊缝 Z 方向划分, 均为 2mm
LSEL,S,LINE,,17,21,2                        !选择线 17、19、21

```



```

LSEL,A,LINE,,24,26,2      !再选取线 24、26
LSEL,A,LINE,,35,36
LSEL,A,LINE,,14,30,16
LESIZE,ALL,2e-3          !设定选择的线上的单元尺寸
                           !沿厚度 Y 方向划分 0.002mm

LSEL,S,LINE,,6,25,19
LSEL,A,LINE,,2,18,16
LESIZE,ALL,,6
LSEL,S,LINE,,41,43,2
LSEL,A,LINE,,50,53,3
LESIZE,ALL,1.5e-3        !沿 X 方向划分 0.0015mm
LSEL,S,LINE,,45,47,2      !选择母材上的线
LSEL,A,LINE,,44,46,2
LESIZE,ALL,,18,0.8
LSEL,S,LINE,,7,27,20
LESIZE,ALL,,12,0.7
LSEL,A,LINE,,5,23,18
LESIZE,ALL,,12,10/7
LSEL,S,LINE,,11,34,23    !焊缝上的线
LSEL,A,LINE,,48,51,3
LESIZE,ALL,,4            !划分体，生成六面体单元
ALLS                     !选择全部
MSHKEY,1                 !映射网格
MSHAPE,0,3D              !六面体形状
VSEL,ALL                 !选择全部体
VATT,,1                  !关联单元属性
ASLV,S                   !选择属于全部体的面
AATT,,1                  !关联单元属性
TYPE,1                   !单元类型为 1
VMESH,ALL                !划分体单元
                           !存档备份有限元模型
ALLS                     !全选
FINISH
! (5) 加载求解
/SOLU
DA,33,SYMM               !对面 33 施加对称面约束
DA,25,SYMM               !对面 25 施加对称面约束
DA,6,UX,0
DA,6,UY,0
DA,6,UZ,0
DA,6,ROTX,0
DA,6,ROTY,0
DA,6,ROTZ,0
/VIEW,, -3,2,-5          !调整窗口视角

```

```

A1=31                                !焊缝上表面
ESEL,S,TYPE,,1                       !选取 1 类单元
*GET,NEMAX,ELEM,,NUM,MAX             !得到所有 1 类单元号码的最大值
*GET,NEMIN,ELEM,,NUM,MIN            !边界条件(没有考虑对流)
NSEL,S,LOC,X,0                       !在 x=0 处施加对称边界条件
DSYM,SYMM,X
ALLS
ANTYPE,TRANS                         !瞬态分析
TRNOPT,FULL                          !瞬态分析选项, 完全分析
NROPT,FULL,,ON                      !完全牛顿-拉普森方法, 激活自适应下降(默认)
NLGEOM,ON                           !大变形
PRED,ON                             !打开预测校正
TIMINT,ON                           !时间积分设置
TINTP,0.005,,,1,0.5,0.2            !定义瞬态综合参数
TREF,25                             !参考温度为 25℃
T=0                                  !求解时间初始值
DT0 = 1e-6                          !建立初始条件的小时间段
DT1 = 0.5                           !起始加热点对应的时间
TINC = LEN/(LNUM*V)                !载荷步时间间隔
!TSUB = 0.2                         !求解温度场子步时间
TIME,DT0
TIMINT,OFF                          !时间积分选项, 关闭(稳态分析)
KBC,1                                !阶越加载
ESEL,S,TYPE,,1                      !选择类型 1 的单元节点
NSLE,S
IC,ALL,TEMP,25                      !初始状态, 温度为 25℃
ALLS
OUTRES,NSOL,ALL
SOLVE
SAVE,'1.11THERMAL_ANALYSIS','DB'

ESEL,S,TYPE,,1                      !查看初始温度场, 应该全为 25 摄氏度
!在第一类单元中加加热流载荷
*DO,IM,0,LNUM,1                    !选择有效半径内节点为当前节点
    ASEL,S,,,A1
    NSLA,R,1
    ESLN,R,0                        !热源加载, 先加载后删除热源
                                    !即先消除上段所加高斯热源, 并将上段的温度值作为
                                    !下段的初始值
C=V*TINC*IM                        !热源位置
B=THIC/COS(ARF/2)
TM=DT1+IM*TINC
TIME,TM
ANTYPE,4,REST
TIMINT,ON

```

```

AUTOTS,ON
KBC,1
DELTIM,0.01,0.01,0.2                                !时间步长
                                                         !以下为施加热流密度载荷

*DO,I,NEMIN,NEMAX,1
  *IF,ESEL(I),EQ,1,THEN                                !如果该单元在上面的集合里，则
    XSY=CENTRX(I)                                       !读取该单元的中心坐标
    YSY=CENTRY(I)
    ZSY=CENTRZ(I)
    RR=ABS(SQRT(XSY*XSY+(YSY-B)*(YSY-B)+(ZSY-C)*(ZSY-C)))
                                                         !该单元中心距离热源中心
    *IF,RR,LE,RADIUS,THEN                              !该单元中心在加热半径范围内
      QR=QMAX*EXP(-K*RR*RR)                            !该单元中心处的热流大小
      SFE,I,NMFACE(I),HFLUX,,QR                       !在每个单元所指定的面上施加热源载荷
    *ENDIF
  *ENDIF
*ENDDO
ALLSEL                                                  !全选求解
OUTRES,NSOL,ALL
SOLVE
ESEL,S,TYPE,,1                                         !选择焊缝1上表面单元
ASEL,S,,,A1
NSLA,R,1
ESLN,R,0
*DO,I,1,6
  SFEDELE,ALL,I,HFLUX                                !删除每个单元六个面上的热载荷
*ENDDO
*ENDDO
ALLS
ESEL,S,LIVE
EPLOT                                                  !查看温度场
SAVE,'1.11THERMAL_ANALYSIS','DB'
ALLSEL
TIME,TM+100
DDELE,ALL,TEMP
ANTYPE,4,REST
TIMINT,ON
AUTOTS,ON
KBC,1
DELTIM,0.01,0.01,0.2
SOLVE

```

## 4.4 热辐射分析

热辐射是指物体发射电磁能,并被其他物体吸收转变为热的热量交换过程。物体温度越高,单位时间辐射的热量就越多。热传导和热对流都需要有传热介质,而热辐射无须任何介质。实质上,在真空中的热辐射效率最高。在工程中通常考虑两个或两个以上物体之间的热辐射,系统中每个物体同时辐射并吸收热量。它们之间的净热量传递可以按照斯忒藩-玻耳兹曼定律(Stefan-Boltzmann Law)计算,即

$$Eb = \sigma \varepsilon T^4$$

$Eb$  —— 物体热辐射能流密度 ( $Eb = c \times u/4$ , 光速与能量密度的乘积除以 4), 单位为  $W/m^2$ ; 某物体在温度  $T$  时单位面积和单位时间的红外辐射总能量。

$T$  —— 物体的绝对温度;

$\sigma$  —— 斯忒藩-玻耳兹曼常数; 自然界中  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$ ;

$\varepsilon$  —— 比辐射率, 即物体表面辐射本领与黑体辐射本领之比值,  $\varepsilon < 1$ 。

### 4.4.1 热辐射分析概述

ANSYS 中提供了三种方法分析热辐射问题。

- (1) 用 LINK31 辐射线单元, 分析两个点或多对点之间的热辐射。
- (2) 用表面效应单元 SURF19 或 SURF22, 分析点对面的热辐射。
- (3) 用 AUX12 热辐射矩阵生成器, 分析面与面之间的热辐射。

热辐射分析要注意温度的单位制, 因为计算热辐射使用的温度单位是绝对温度。如果在加载时使用的是华氏温度, 就要设置 460 的差值; 如果使用的是摄氏温度, 差值为 273。

### 4.4.2 实例分析: 黑体热辐射分析

#### 1. 问题描述

任何物体都具有不断辐射、吸收、发射电磁波的本领, 辐射出去的电磁波在各个波段是不同的, 也就是具有一定的谱分布。这种谱分布与物体本身的特性及其温度有关, 为了研究不依赖于物质具体物性的热辐射规律, 物理学家定义了一种理想物体——黑体 (Black Body), 以此作为热辐射研究的标准物体。

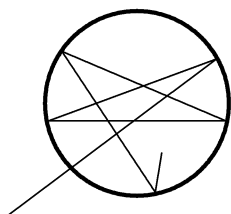


图 4-32 黑体示意图

所谓黑体是指入射的电磁波全部被吸收, 既没有反射, 也没有透射 (当然黑体仍然要向外辐射)。如图 4-32 所示为黑体示意图, 其表面积为  $1m^2$ , 辐射率和形状系数均假设为 1, 在某种环境下假设其温度为  $2500^\circ C$ , 而周围的环境温度为  $25^\circ C$ , 那么该黑体的辐射热流率为多少?

基于上述描述, 该问题属于热辐射问题, 选择相应的热辐射单元 LINK31 来建立单元进行求解。

## 2. 定义工作文件名及工作标题

### 1) 定义工作文件名

依次单击: Utility Menu→File→Change Jobname, 弹出“Change Jobname”对话框, 在“[/FILNAM]”选项的输入栏中输入工作文件名为“EXER4-3”, 勾选“New log and error files”选项的复选框, 设置为“Yes”, 单击“OK”按钮。

对应命令流:

```
/FILNAME,EXER4-3
```

### 2) 定义工作标题

依次单击: Utility Menu→File→Change Title, 弹出“Change Title”对话框。在“[/TITLE]”选项的输入栏中输入标题为“BLACK BODY”, 单击“OK”按钮。

对应命令流:

```
/TITLE,BLACK BODY
```

### 3) 定义图形用户界面

依次单击: Main→Preferences, 弹出“Preferences for GUI Filtering”对话框, 勾选“Thermal”选项的复选框, 单击“OK”按钮。

## 3. 定义单元类型及材料属性

### 1) 定义单元类型

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add→Edit→Delete, 弹出“Element Types”拾取对话框, 单击“Add”按钮, 弹出“Library of Element Types”对话框, 如图 4-33 所示。在“Library of Element Types”选项的左右两个列表中分别选择“Thermal Mass→Link”和“3D radiation31”选项, 在“Element type reference number”选项的输入栏中输入“1”, 单击“OK”按钮。

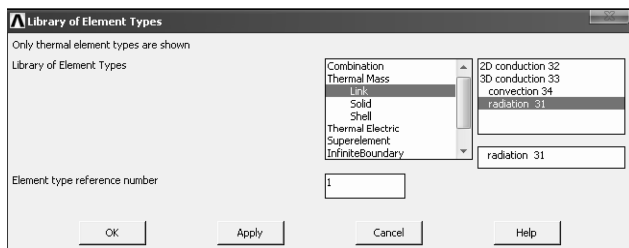


图 4-33 “Library of Element Types”对话框

对应命令流:

```
ET,1,LINK31
```

### 2) 定义单元的实常数

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Real Contants→Add→Edit→Delete, 弹出“Real Contants”窗口, 单击“Add”按钮, 弹出“Element Type for Real Constants”对话框, 单击

“OK”按钮，弹出“Real Constant Set Number 1, for LINK31”对话框，如图 4-34 所示。分别在“Real Constant Set No.”、“Radiating surface area AREA”、“Geometric form factor FORMFACTOR”、“Emissivity EMISSIVITY”和“Stefan-Boltzmann Constant SBC”选项的输入栏中输入“1”、“1”、“1”、“1”和“0”，然后单击“OK”按钮。单击“Real Constants”对话框上的“Close”按钮，退出实常数的设置。

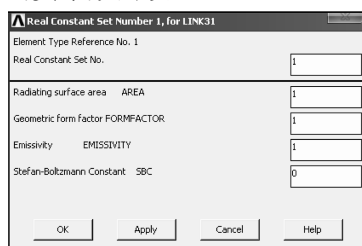


图 4-34 “Real Constant Set Number 1, for LINK31”对话框

对应命令流:

```
R, 1,1,1,1
```

#### 4. 建立几何模型

##### 1) 生成节点

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Nodes→On Active CS, 弹出“Create Nodes in Active Coordinate System”对话框,如图 4-35 所示。在“NODE Node number”选项的输入栏中输入“1”,在“X,Y,Z Location in active CS”选项的输入栏中输入节点坐标“0”、“0”和“0”,单击“Apply”按钮。再次弹出“Create Nodes in Active Coordinate System”对话框,在“NODE Node number”选项的输入栏中输入“2”,在“X,Y,Z Location in active CS”选项的输入栏中输入节点坐标“0”、“0”和“0”,单击“OK”按钮。

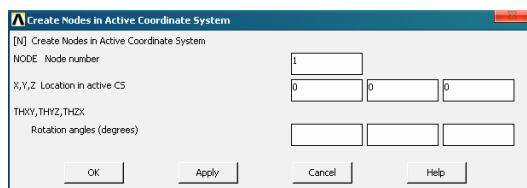


图 4-35 “Create Nodes in Active Coordinate System”对话框

对应命令流:

```
N,1,0,0,0
N,2,0,0,0
```

##### 2) 由节点生成单元

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Element→Auto Numbered→Thru Nodes, 弹出“Element from Nodes”拾取对话框,在输入栏中输入“1,2”,单击“OK”按钮。

对应命令流:

```
E,1,2
```

### 3) 选择全部

依次单击: Utility Menu→Select→Everything。

对应命令流:

ALLSEL

### 4) 保存模型

依次单击: Utility Menu→File→Save As, 弹出“Save Database”对话框, 在“Save Database to”选项的下拉列表中选择“EXER 4.22.db”, 单击“OK”按钮。

## 5. 施加载荷并求解

### 1) 定义分析类型

依次单击: Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis, 弹出“New Analysis”对话框, 如图 4-36 所示, 设置分析类型为“Steady-State”, 单击“OK”按钮。

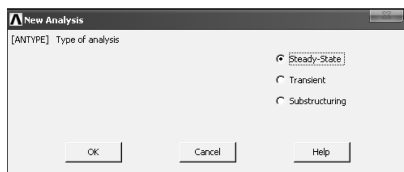


图 4-36 “New Analysis”对话框

对应命令流:

ANTYPE,STATIC

### 2) 设置时间和时间步长

依次单击: Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time→Frequency→Time-Time Step, 弹出“Time and Time Step Options”对话框, 如图 4-37 所示。在“[TIME] Time at end of load step”选项的输入栏中输入“1”, 勾选“[KBC] Stepped or ramped b.c.”选项组中“Stepped”的复选框, 勾选“[AUTOTS] Automatic time stepping”选项中“ON”的复选框, 单击“OK”按钮。

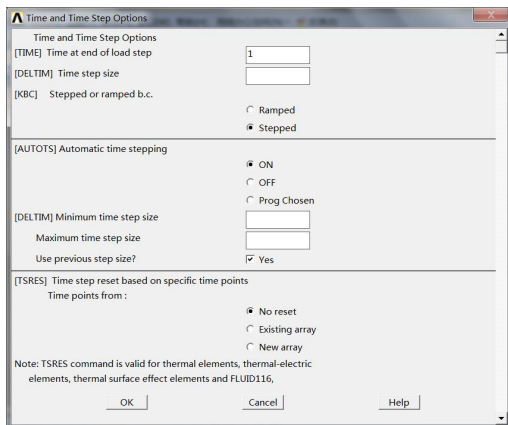


图 4-37 “Time and Time Step Options”对话框

对应命令流:

```
TIME,1
AUTOTS,ON
```

### 3) 定义辐射分析

依次单击: Main Menu→Solution→Radiation Opts→Solution Opt, 出现“Radiation Solution Options”对话框, 如图 4-38 所示。在 “[STEF] Stefan-Boltzmann Const.” 选项的输入栏中输入 “5.67e-8”, 在 “[TOFFST] Temperature difference-between absolute zero and zero of active temp scale” 选项的输入栏中输入 “273”, 单击 “OK” 按钮。

对应命令流:

```
KBC,1
STEF,5.67e-8
TOFFST,273
```

### 4) 施加温度载荷

依次单击: Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Thermal→Temperature→On Nodes, 弹出 “Apply TEMP on Nodes” 拾取对话框, 在其输入栏中输入 “1”, 单击 “OK” 按钮。弹出 “Apply TEMP on Nodes” 对话框, 如图 4-39 所示。在 “Lab2 DOFs to be constrained” 选项组中选择 “TEMP”, 在 “VALUE Load TEMP value” 选项的输入栏中输入 “2500”, 单击 “OK” 按钮。

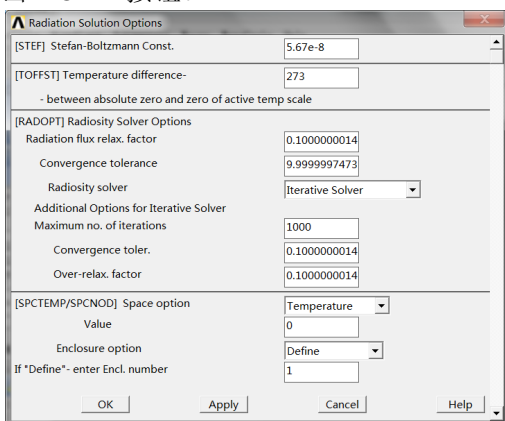


图 4-38 “Radiation Solution Options” 对话框

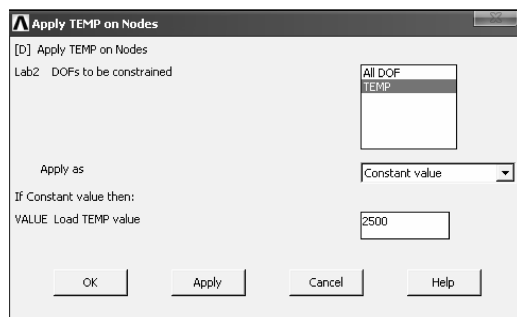


图 4-39 “Apply TEMP on Nodes” 对话框

再次依次单击: Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Thermal→Temperature→On Nodes 命令, 弹出 “Apply TEMP on Nodes” 拾取对话框, 在其输入栏中输入 “2”, 单击 “OK” 按钮。弹出 “Apply TEMP on Nodes” 对话框, 在 “Lab2 DOFs to be constrained” 选项组中选择 “TEMP”, 在 “VALUE Load TEMP value” 选项的输入栏中输入 “25”, 单击 “OK” 按钮。

对应命令流:

```
D,1,TEMP,2500
D,2,TEMP,25
```



### 5) 选择全部

依次单击: Utility Menu→Select→Everything。

对应命令流:

```
ALLSEL
```

### 6) 求解

依次单击: Main Menu→Solution→Solve→Current LS, 弹出“Solve Current Load Step”对话框, 单击“OK”按钮开始求解。当弹出“Solution is done”对话框时表示求解完成, 单击“Close”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
SOLVE
```

### 7) 保存求解结果

依次单击: Utility Menu→File→Save As, 弹出“Save Database”对话框, 在“Save Database to”选项的下拉列表中选择“EXER 4.22.db”, 单击“OK”按钮。

## 6. 进入一般后处理模块, 查看结果

### 1) 读取最终求解结果

依次单击: Main Menu→General Postproc→Read Results→Last Set, 如图 4-40 所示。

对应命令流:

```
SET, LAST
```

### 2) 显示节点辐射换热热量

依次单击: Main Menu→General Postproc→List Results→Reaction Solu, 弹出“List Reaction Solution”对话框。在“Lab Item to be listed”选项的下拉列表中选择“Heat folw HEAT”选项, 单击“OK”按钮, 弹出“PRRSOL Command”窗口, 如图 4-41 所示, 其中显示的就是节点辐射换热热量。

对应命令流:

```
PRRSOL
```

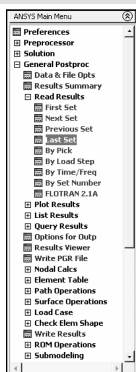


图 4-40 读取数据示意图

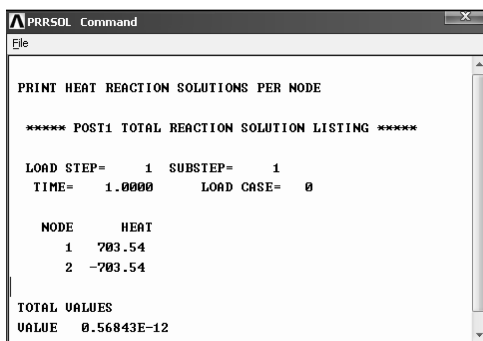


图 4-41 “PRRSOL Command”窗口

### 4.4.3 黑体热辐射分析完整求解命令流

FINISH	!退出以前模块
/CLEAR, START	!清除系统中数据, 读入启动文件设置
! (1) 定义工作文件名及工作标题	
/FILENAME, EXER4-3	!指定当前工程的文件名
/TITLE, BLACK BODY	!定义标题
! (2) 定义单元类型及材料属性	
/PREP7	!进入前处理模块
ET, 1, LINK31	!选择热辐射单元
R, 1, 1, 1, 1	!定义实常数
! (3) 建立几何模型	
N, 1, 0, 0, 0	
N, 2, 0, 0, 0	!定义节点 1, 2
E, 1, 2	!生成单元
ALLSEL	!选择所有的模块
FINISH	!退出前处理模块
! (4) 施加载荷并求解	
/SOLU	!进入求解模块
ANTYPE, STATIC	!定义分析类型为稳态
TIME, 1	!定义结束时间
AUTOTS, ON	!打开自动步长
KBC, 1	
STEF, 5.67e-8	!定义 Stefan-Boltzmann 常数
TOFFST, 273	!定义在摄氏温度下的绝对温差
D, 1, TEMP, 2500	!在节点 1 上施加温度为 2500 的载荷
D, 2, TEMP, 25	!在节点 2 上施加温度为 25 的载荷
ALLSEL	!选择所有的模块
SOLVE	!求解
FINISH	!退出求解模块
! (5) 进入一般后处理, 查看结果	
/POST1	!进入后处理模块
SET, LAST	!读取最后一步的结果
PRRSOL	!显示节点辐射换热量
FINISH	!退出后处理模块

## 4.5 相变热分析

在处理和热分析问题时, 经常会碰到如液体的凝固或固结、固体的熔化等相变问题。而对于相变问题的分析是 ANSYS 热分析最强大的功能之一。因此, 无论是金属浇铸、合金生产, 还是材料热处理问题中复杂的相变问题, ANSYS 都可以轻松地进行求解。

### 4.5.1 相变热分析概述

所谓的相变是指系统能量的变化可能导致的物质原子结构发生改变，通常包括固结、熔化或者凝固。相变问题需要考虑熔融潜热，即在相变过程中吸收或释放的热量。在求解相变问题时，ANSYS 通过定义材料的焓随温度变化来考虑熔融潜热，焓的单位为 J，是密度与比热的乘积对温度的积分，即

$$H = \int \rho c(T) dT$$

在 ANSYS 中，分析相变问题既应当设定足够小的时间步长，又应将自动时间步长设置为 ON，以使程序在相变前、相变中和相变后自动调整时间步长。选用单元时，既可以选择低阶的热单元，又可以选择高阶的热单元。当选用低阶的热单元时，可以选择 PLANE55 或者 SOLID70。而选用高阶的单元时，就必须将 KEYOPT(1)设置为 1。

### 4.5.2 实例分析：冰块融化的热分析

#### 1. 问题描述

现有一器皿，取其横截面的 1/2，形状如图 4-42 所示，其内盛放着温度为 0℃ 的冰块，周围的温度为常温 25℃，对流系数为 12.5W/(m<sup>2</sup>·℃)。冰块热性能参数参见表 4-3，(图中的长度单位为 m)，试求解以下问题：

- (1) 冰块需要多长时间才能完全融化，即要求融化后水中各点的温度在 0℃ 以上。
- (2) A 点随时间的变化曲线。

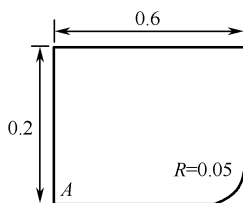


图 4-42 几何模型示意图

表 4-3 冰块热性能参数

温度/℃	导热系数/W·m <sup>-1</sup> ·℃ <sup>-1</sup>	密度/kg·m <sup>-3</sup>	焓/J
-10	0.6	1000	0
-1	0.6	1000	3.78e7
0	0.6	1000	7.98e7
10	0.6	1000	1.22e8

对于本例，该问题属于相变问题，考虑其对称性，取容器中冰块横截面的 1/2 建立模型，并选择 PLANE55 轴对称热分析单元进行求解。

## 2. 定义工作文件名和工作标题

### 1) 定义工作文件名

依次单击: Utility Menu→File→Change Jobname, 弹出“Change Jobname”对话框, 在“[/FILNAM]”选项的输入栏中输入工作文件名为“EXER4-4”, 勾选“New log and error files”选项的复选框, 设置为“Yes”, 单击“OK”按钮。

对应命令流:

```
FILNAME,EXER4-4
```

### 2) 定义工作标题

依次单击: Utility Menu→File→Change Title, 弹出“Change Title”对话框。在“[/TITLE]”选项的输入栏中输入标题为“BINGSHUIRONGHUA”, 单击“OK”按钮。

对应命令流:

```
/TITLE,BINGSHUIRONGHUA
```

### 3) 定义图形用户界面

依次单击: Main→Preferences, 弹出“Preferences for GUI Filtering”对话框, 勾选“Thermal”选项的复选框, 单击“OK”按钮。

## 3. 定义单元类型及材料属性

### 1) 定义单元类型

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add→Edit→Delete, 弹出“Element Types”拾取对话框, 单击“Add”按钮, 弹出“Library of Element Types”对话框, 如图 4-43 所示。在“Library of Element Types”选项的左右两侧列表框中分别选择“Thermal Mass→Solid”和“Quad 4node 55”, 在“Element type reference number”选项的输入栏中输入“1”, 单击“OK”按钮。

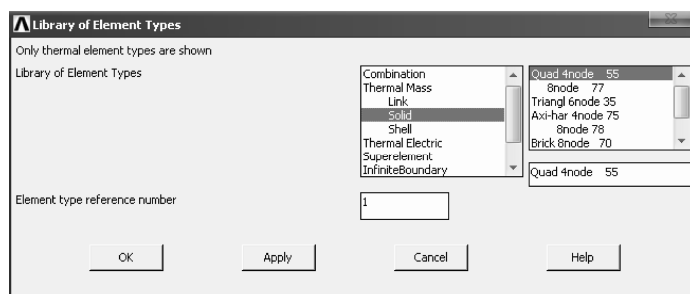


图 4-43 “Library of Element Types”对话框

对应命令流:

```
ET,1,PLANE55
```

## 2) 定义单元选项

单击“Element Type”对话框中“Option”按钮，弹出“PLANE55 element type options”对话框，如图4-44所示。在“Element behavior K3”选项的下拉列表中选择“Axisymmetric”，单击“OK”按钮。

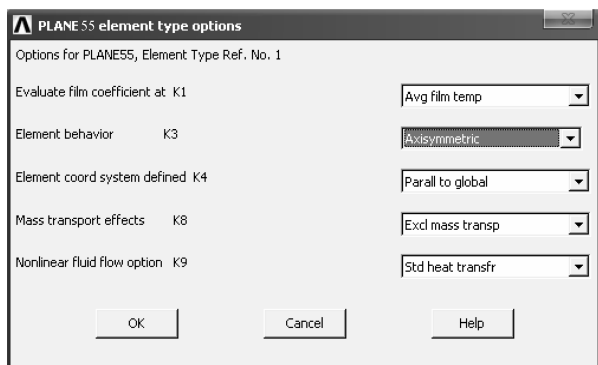


图 4-44 “PLANE55 element type options”对话框

对应命令流:

```
KEYOPT,1,3,1
```

## 3) 设置材料属性

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models, 弹出“Define Material Models Behavior”窗口，双击“Material Model Available”选项列表框中的“Thermal→Conductivity→Isotropic”，弹出“Conductivity for Material Number 1”对话框，如图4-45所示。在“KXX”选项的输入栏中输入圆柱体的导热系数为“0.6”，单击“OK”按钮。双击“Define Material Models Behavior”窗口中的“Density”选项，弹出“Density for Material Number 1”对话框，如图4-46所示。在“DENS”选项的输入栏中输入密度为“1000”，单击“OK”按钮，双击“Define Material Models Behavior”窗口中“Enthalpy”的选项，弹出“Enthalpy for Material Number 1”对话框，如图4-47所示。单击“Add Temperature”按钮直到“Temperatures”选项栏出现“T4”为止，在其输入栏中输入相应数值，单击“OK”按钮。依次单击: Material→Exit, 退出材料属性的设置。

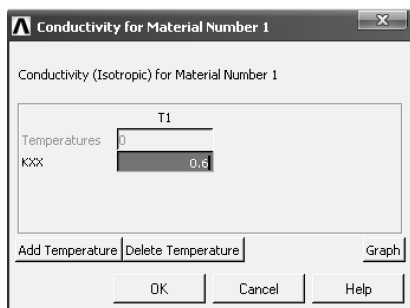


图 4-45 “Conductivity for Material Number 1”对话框

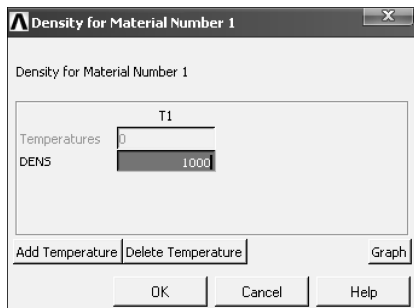


图 4-46 “Density for Material Number 1”对话框

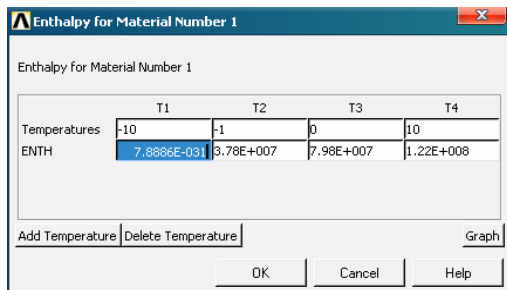


图 4-47 “Enthalpy for Material Number 1”对话框

对应命令流:

```
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,KXX,1,,0.6
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,1,,1000
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,-10
MPTEMP,2,-1
MPTEMP,3,0
MPTEMP,4,10
MPDATA,ENTH,1,,0
MPDATA,ENTH,1,,3.78e7
MPDATA,ENTH,1,,7.98e7
MPDATA,ENTH,1,,1.22e8
```

#### 4. 建立几何模型

##### 1) 创建关键点

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→In Active CS, 弹出“Create Keypoints in Active Coordinate System”对话框, 如图 4-48 所示。在“NPT Keypoint number”选项的输入栏中输入关键点编号“1”, 在“X,Y,Z Location in active CS”选项的输入栏中分别输入关键点坐标“0”、“0”、“0”, 单击“OK”按钮。参考以上的操作, 依次创建以下几个关键点: 2 (0.55, 0, 0), 3 (0.55, 0.05, 0), 4 (0.6, 0.05, 0), 5 (0.6, 0.2, 0), 6 (0, 0.2, 0)。

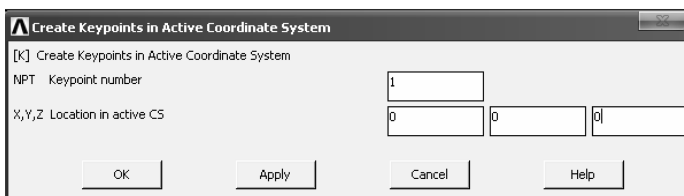


图 4-48 “Create Keypoints in Active Coordinate System”对话框

对应命令流:

```
K,1,0,0,0
K,2,0.55,0,0
K,3,0.55,0.05,0
K,4,0.60,0.05,0
K,5,0.60,0.20,0
K,6,0,0.20,0
```

## 2) 打开关键点编号控制

依次单击: Utility Menu→Plotctrls→Numbering, 弹出“Plot Numbering Controls”对话框, 如图 4-49 所示。分别勾选“KP Keypoint numbers”和“LINE Line numbers”选项的复选框, 使其设置为“ON”, 单击“OK”按钮。

对应命令流:

```
/PNUM,LINE,1
/PNUM,KP,1
```

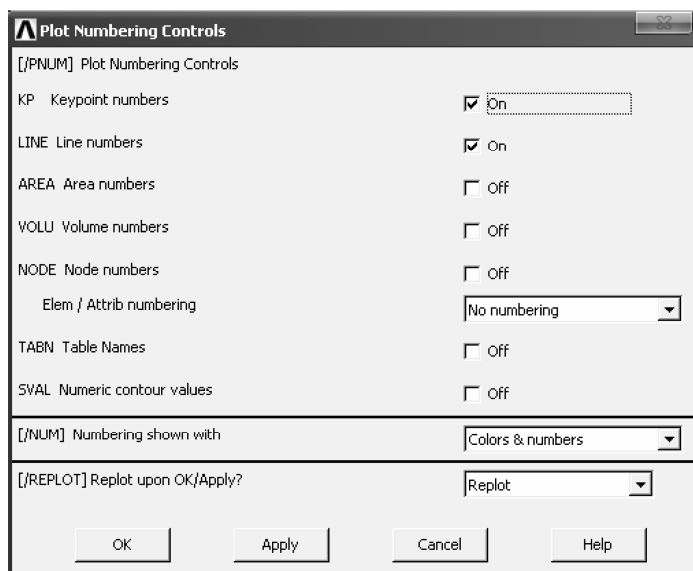


图 4-49 “Plot Numbering Controls”对话框

## 3) 生成线

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→Straight Line, 弹出“Create Straight Line”拾取对话框, 如图 4-50 所示。在其输入栏中输入“1,2”, 单击“Apply”按钮; 再次弹出“Create Straight Line”拾取对话框, 在其输入栏中输入“2,3”, 单击“Apply”按钮; 再次弹出“Create Straight Line”拾取对话框, 在其输入栏中输入“3,4”, 单击“Apply”按钮; 再次弹出“Create Straight Line”拾取对话框, 在其输入栏中输入“4,5”, 单击“Apply”按钮; 再次弹出“Create Straight Line”拾取对话框, 在其输入栏中输入“5,6”, 单击“Apply”按钮; 再次弹出“Create Straight Line”拾取对话框, 在其输入栏中输入“6,1”, 单击“OK”按钮。

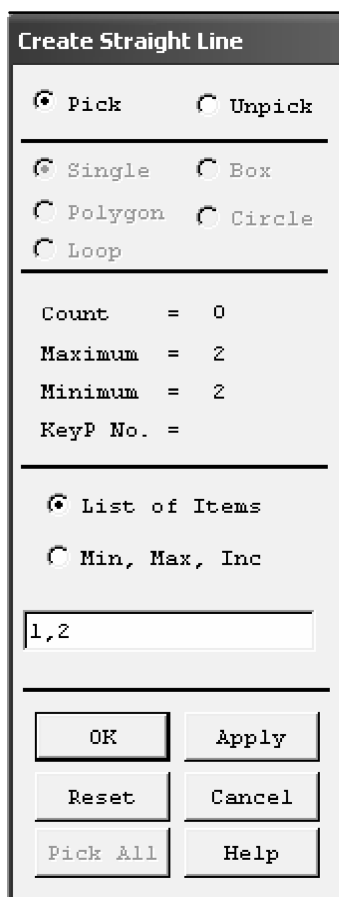


图 4-50 “Create Straight Line”拾取对话框

对应命令流:

```
LSTR,1,2
LSTR,2,3
LSTR,3,4
LSTR,4,5
LSTR,5,6
LSTR,6,1
```

#### 4) 生成面

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→By Lines, 弹出“create area by l”拾取对话框, 在其输入栏中输入“1,2,3,4,5,6”, 单击“OK”按钮。依次单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Circle→Partial Annulus, 弹出“Part Annular Circ Area”拾取对话框, 如图 4-51 所示。依次在“WP X”、“WP Y”、“Rad-1”和“Theta-1”选项的输入栏中输入“0.55”、“0.05”、“0.05”和“-90”, 单击“OK”按钮, 生成一个 1/4 圆弧面。



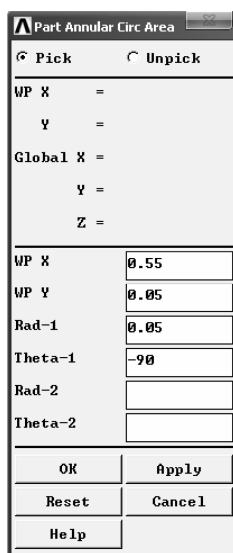


图 4-51 “Part Annular Circ Area”拾取对话框

对应命令流:

```
AL,1,2,3,4,5,6
```

```
CYL4,0.55,0.05,0.05,-90,,
```

5) 将面 A1 和 A2 合成一个面

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Add→Areas, 弹出“Add Areas”拾取对话框, 如图 4-52 所示。在其输入栏中输入“1,2”, 单击“OK”按钮。

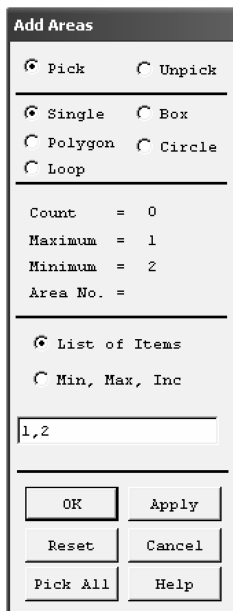


图 4-52 “Add Areas”拾取对话框

对应命令流:

AADD,ALL

6) 将线 L2 和 L5 合并成一条线

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Add→Lines, 弹出“Add Lines”拾取对话框, 在其输入栏中输入“2,5”, 单击“OK”按钮。

对应命令流:

LCOMB,4,10

7) 压缩编号

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Numbering Ctrls→Compress Numbers, 弹出“Compress Numbers”对话框, 如图 4-53 所示。在“Label Item to be compressed”选项的下拉列表中选择“All”, 单击“OK”按钮。

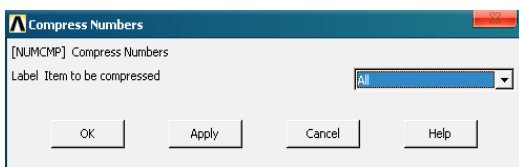


图 4-53 “Compress Numbers”对话框

对应命令流:

NUMCMP,ALL

## 5. 有限元网格划分

1) 选择线段并设置线段等分数

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Ctrls→Manualsize→Lines→Picked lines, 弹出“Element Sizes on Picked Lines”拾取对话框, 在其输入栏中输入“1,2,3,4”, 单击“OK”按钮, 弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框, 如图 4-54 所示。在“NDIV No. of element divisions”选项的输入栏中输入“20”, 单击“OK”按钮。

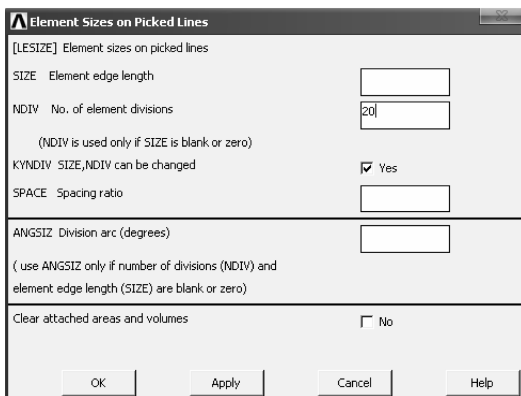


图 4-54 “Element Sizes on Picked Lines”对话框

对应命令流:

```
LSEL,S,,,1,4,1  
LESIZE,ALL,,,20
```

## 2) 划分映射网格

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Area→Mapped→By Corners, 弹出“Map Mesh Area by Corners”拾取对话框, 在其输入栏中输入“1”, 单击“OK”按钮。再次弹出“Map Mesh Area by Corners”拾取对话框, 在其输入栏中输入“4,1,3”, 单击“OK”按钮, 如果弹出“WARNING”对话框, 直接单击“OK”按钮, 生成的网格示意图如图 4-55 所示。

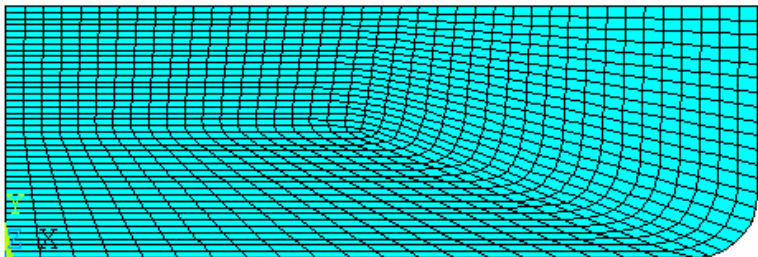


图 4-55 生成的网格示意图

对应命令流:

```
AMAP,1,4,1,3,
```

## 3) 保存网格划分结果

依次单击: Utility Menu→File→Save As, 弹出“Save Database”对话框, 在“Save Database to”选项的下拉列表中选择“EXER 4.31.db”, 单击“OK”按钮。

# 6. 施加载荷并求解

## 1) 定义分析类型

依次单击: Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis, 弹出“New Analysis”对话框, 如图 4-56 所示。设置分析类型为“Transient”, 单击“OK”按钮, 弹出“Transient Analysis”对话框, 采用其默认的设置, 单击“OK”按钮。



图 4-56 “New Analysis”对话框

对应命令流:

```
ANTYPE,TRANS
```

## 2) 设置初始温度

依次单击: Main Menu→Solution→Define Loads→Settings→Uniform Temp, 弹出“Uniform Temperature”对话框, 如图 4-57 所示。在 “[TUNIF]Uniform temperature” 选项的输入栏中输入“-1”, 单击“OK”按钮。

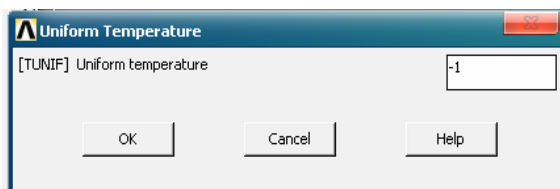


图 4-57 定义初始温度对话框

对应命令流:

```
TUNIF,-1,
```

## 3) 选择线 L1、L2 及 L3

依次单击: Utility Menu→Select→Entities, 弹出“Select Entities”拾取对话框, 如图 4-58 所示。在上面两个下拉列表中分别选择“Lines”和“By Num/Pick”, 勾选“From Full”选项的单选按钮, 单击“OK”按钮, 弹出“Select lines”拾取对话框, 如图 4-59 所示。在其输入栏中输入“1,2,3”, 单击“OK”按钮。

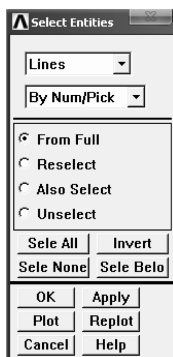


图 4-58 “Select Entities”拾取对话框

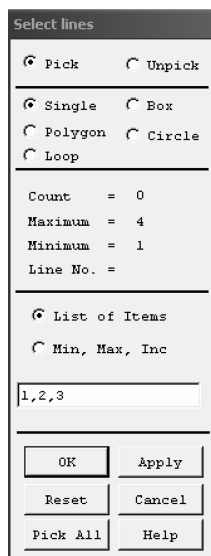


图 4-59 “Select lines”拾取对话框

对应命令流:

```
LSEL,S,,,1,3,1
```

#### 4) 选择所选线上的所有节点

依次单击: Utility Menu→Select→Entities, 弹出“Select Entities”拾取对话框, 在该拾取对话框的2个下拉列表中分别选择“Nodes”和“Attached to”, 并在选项组中选择“Lines all”选项, 单击“OK”按钮。

对应命令流:

```
NSLL,S,1
```

#### 5) 在节点上施加对流载荷

依次单击: Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Thermal→Convection→On Nodes, 弹出“Apply CONV on nodes”拾取对话框, 单击“Pick All”按钮, 弹出“Apply CONV on nodes”对话框, 如图4-60所示。在“VALI Film coefficient”选项的输入栏中输入“12.5”, 在“VAL2I Bulk temperature”选项的输入栏中输入“25”, 单击“OK”按钮。

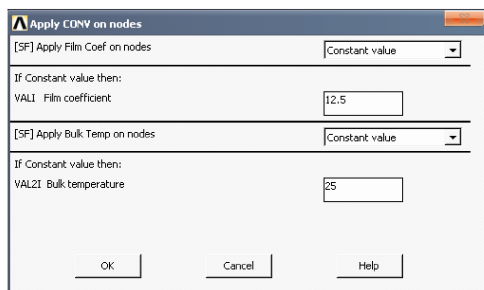


图 4-60 “Apply CONV on nodes”对话框

对应命令流:

```
SF,ALL,CONV,12.5,25
```

#### 6) 设置计算选项

依次单击: Main Menu→Solution→Analysis Type→Sol'n Controls, 弹出“Solution Controls”对话框, 如图4-61所示。单击“Basic”选项卡, 进行如图4-61所示的设置, 设置完成后单击“OK”按钮。

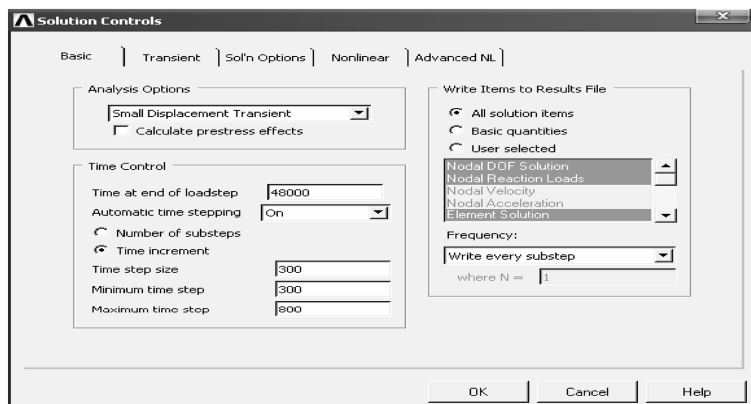


图 4-61 “Solution Controls”对话框

对应命令流:

```
DELTIM,300,300,800
OUTRES,ALL,ALL
AUTOTS,1
TIME,48000
```

7) 选择全部

依次单击: Utility Menu→Select→Everything。

对应命令流:

```
ALLSEL
```

8) 求解

依次单击: Main Menu→Solution→Solve→Current LS, 弹出“Solve Current Load Step”对话框, 单击“OK”按钮开始求解, 当弹出“Solution is done”对话框时表示求解完成, 单击“Close”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
/SOLVE
```

9) 保存求解结果

依次单击: Utility Menu→File→Save As, 弹出“Save Database”对话框, 在“Save Database to”选项的下拉列表中选择“EXER 4.32.db”, 单击“OK”按钮。

## 7. 进入一般后处理, 查看结果

1) 读取 39 420 秒时的计算结果

依次单击: Main Menu→General Postproc→Read Results→By Time→Freq, 弹出“Read Results by Time or Frequency”对话框, 如图 4-62 所示。在“TIME Value of time or freq”选项的输入栏中输入“39420”, 单击“OK”按钮。

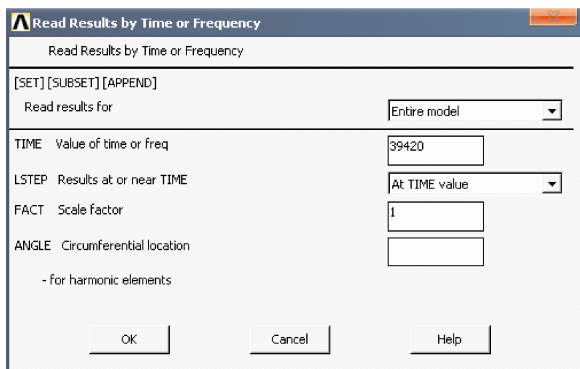


图 4-62 “Read Results by Time or Frequency”对话框

对应命令流:

```
SET,,1,,39420
```

## 2) 查看温度场等值线图

依次单击: Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu, 弹出“Contour Nodal Solution Data”对话框, 选择“Nodal Temperature”选项, 单击“OK”按钮, 弹出  $t = 39420$  s 的温度场分布等值线图, 如图 4-63 所示, 此时模型的最低温度为  $0.0237^{\circ}\text{C}$ , 说明冰块已经完全融化了。

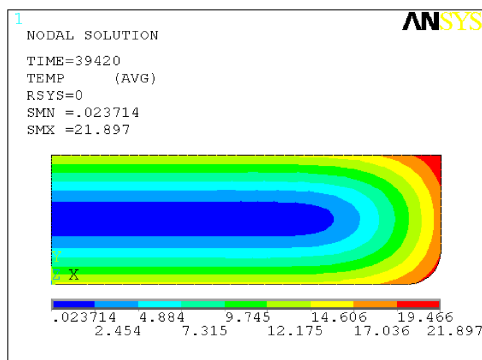


图 4-63 图形显示  $t=39420$  s 时温度场分布等值线图

**注意:** 这里如何选择 39420 s, 查看其温度场等值线图呢? 可以采用插值法, 即先输入终止时间, 观察其温度场等值线图, 发现其内各点的温度均在  $0^{\circ}\text{C}$  以上, 再选择终止时间 $\times 0.5$ , 观察其温度场等值线图, 类似地通过多次插值, 就可以选择出合适的时间, 在那一时间点附近冰块刚好融化, 其内各点的温度均在  $0^{\circ}\text{C}$  以上。

对应命令流:

```
PLNSOL, TEMP
```

## 3) 绘制终点时的温度场等值线图

依次单击: Main Menu→General Postproc→Read Results→Last Set, 单击“OK”按钮。再次依次单击: Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu, 弹出“Contour Nodal Solution Data”对话框, 选择“Nodal Temperature”选项, 单击“OK”按钮, 弹出终点时温度场分布等值线图, 如图 4-64 所示。

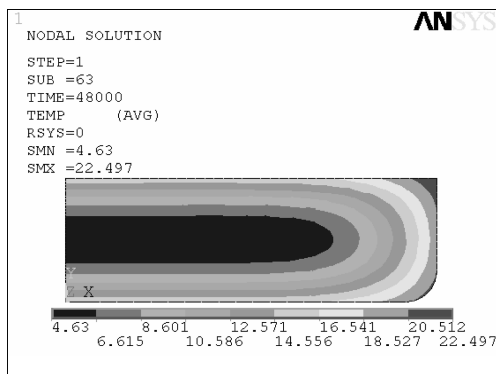


图 4-64 图形显示终点时温度场分布等值线图

对应命令流:

```
SET, LAST
PLNSOL, TEMP
```

#### 4) 进入 POST26 后处理器

依次单击: Main Menu→TimeHist Postpro, 弹出“Time History Variables”拾取对话框, 单击“Close”按钮退出。

对应命令流:

```
/POST26
```

#### 5) 设置 X 和 Y 坐标轴标题

依次单击: Utility Menu→PlotCtrls→Style→Graphs→Modify Axes, 弹出“Axis Modifications for Graph Plots”对话框, 在“[/AXLAB] X-axis label”选项的输入栏中输入“TIME,(sec)”, 在“[/AXLAB] Y-axis label”选项的输入栏中输入“TEMP”, 在“[/GTHK] Thickness of axis”选项的下拉列表中选择默认选项, 单击“OK”按钮。

对应命令流:

```
/AXLAB,X,temp
/AXLAB,Y,time
```

#### 6) 选择节点 A

依次单击: Utility Menu→Select→Entities, 弹出“Select Entities”拾取对话框, 在第一个下拉列表中选择“Nodes”选项, 在第二个下拉列表中选择“By Location”选项, 在第三个选项组中选择“X coordinates”选项, 并在“Min,Max”选项的输入栏中输入“0”, 在第四个选项组中选择“From Full”选项, 单击“Apply”按钮, 再次弹出“Select Entities”拾取对话框, 在第三个选项组中选择“Y coordinates”选项, 并在“Min,Max”选项的输入栏中输入“0.01”, 在第四个选项组中选择“Reselect”选项, 单击“OK”按钮, 如图 4-65 所示。

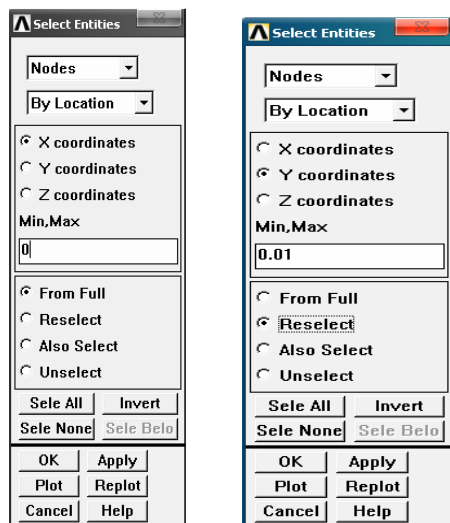


图 4-65 “选择节点”拾取对话框



对应命令流:

```

NSEL,S,LOC,X,0
NSEL,R,LOC,Y,0.01

```

#### 7) 选择节点数据

依次单击: Utility Menu→Parameters→Get Scalar Data, 弹出“Get Scalar Data”对话框, 如图 4-66 所示。在“Type of data to be retrieved”选项的左右两个列表中分别选择“Model data”和“For selected set”选项, 单击“OK”按钮, 弹出“Get Data for Selected Entity Set”对话框, 如图 4-67 所示。在“Name of parameter to be defined”选项的输入栏中输入“POINTA”, 在“Data to be retrieved”选项的左右两个列表中分别选择“Current node set”和“Highest node num”选项, 单击“OK”按钮。

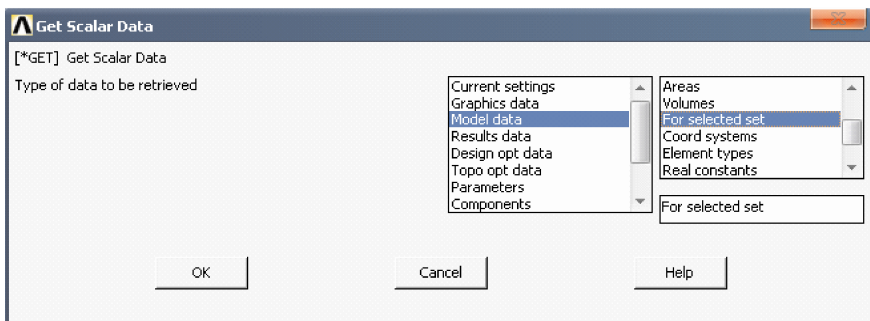


图 4-66 “Get Scalar Data”对话框

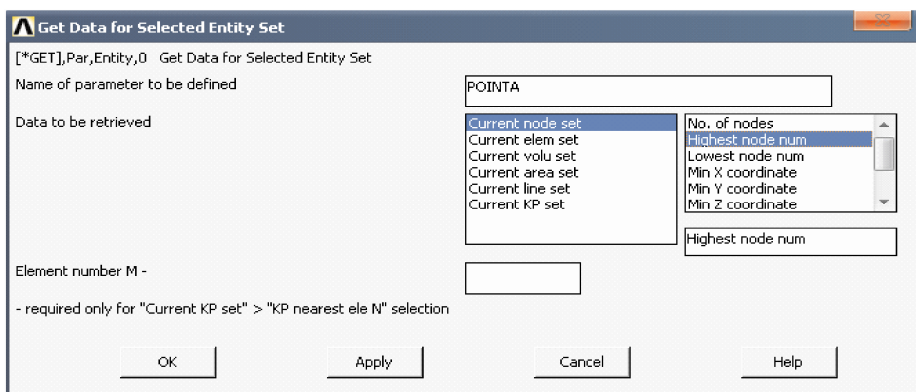


图 4-67 “Get Data for Selected Entity Set”对话框

对应命令流:

```
*GET,POINTA,NODE,,NUM,MAX
```

#### 8) 绘制 A 点温度随时间的变化规律曲线

依次单击: Main Menu→TimeHist Postpro→Define Variables, 弹出“Defined Time-Hisroty Variables”拾取对话框, 单击“Add”按钮, 弹出“Add Time-Hisroty Variables”对话框, 选择“Nodal DOF result”选项, 单击“OK”按钮, 弹出“Define Nodal Data”拾取对话框, 在

输入栏中输入“POINTA”，单击“OK”按钮，弹出“Define Nodal Data”对话框，按照其默认设置，单击“OK”按钮，然后单击“Defined Time-Hisroty Variables”对话框上的“Close”按钮关闭该对话框。

依次单击：Main Menu→TimeHist Postpro→Graph Variables，弹出“Graph Time-Hisroty Variables”对话框，在“NVAR1 1<sup>st</sup> variable to graph”选项的输入栏中输入“2”，单击“OK”按钮，可以在窗口中显示出 A 点温度随时间变化的关系曲线图，如图 4-68 所示。

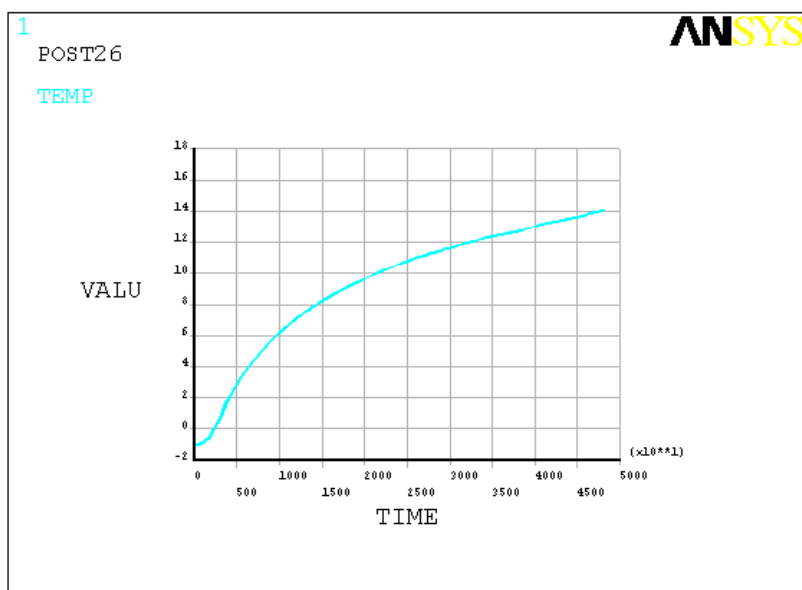


图 4-68 图形显示 A 点温度随时间变化的关系曲线

对应命令流：

```
NSOL,2,POINTA,TEMP
PLVAR,2
```

### 4.5.3 完整命令流

FINISH	!退出以前模块
/CLEAR, START	!清除系统中数据，读入启动文件设置
! (1) 定义工作文件名和工作标题	
/FILENAME, EXER4-4	!指定当前工程的文件名
/TITLE, BINGSHUIRONGHUA	!定义标题
! (2) 定义单元类型	
/PREP7	!进入前处理模块
ET, 1, PLANE55	!选择相变单元
KEYOPT, 1, 1, 0	
KEYOPT, 1, 3, 1	
KEYOPT, 1, 4, 0	!定义模型的轴对称性

```

KEYOPT,1,8,0
KEYOPT,1,9,0
! (3) 设置材料属性
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,KXX,1,,0.6                                !定义材料的热传导系数
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,1,,1000                                !定义材料的密度
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,-10
MPTEMP,2,-1
MPTEMP,3,0
MPTEMP,4,10
MPDATA,ENTH,1,,0
MPDATA,ENTH,1,,3.78e7
MPDATA,ENTH,1,,7.98e7
MPDATA,ENTH,1,,1.22e8                                !定义材料的焓值
! (4) 建立几何模型、有限元网格划分
K,1,0,0,0
K,2,0.55,0,0
K,3,0.55,0.05,0
K,4,0.60,0.05,0
K,5,0.60,0.20,0
K,6,0,0.20,0                                !定义模型的各个关键点
LSTR,1,2
LSTR,2,3
LSTR,3,4
LSTR,4,5
LSTR,5,6
LSTR,6,1                                !按顺序将各点之间进行连线
AL,1,2,3,4,5,6                                !生成面 1
CYL4,0.55,0.05,0.05,-90,,                                !生成面 2
AADD,ALL                                !合并面 1 和面 2
LCOMB,4,10                                !合并线 4 和线 10
NUMCMP,ALL                                !压缩线编号
LPLOT
LSEL,S,,,1,4,1                                !选中线 1,2,3,4
LESIZE,ALL,,,20                                !将线划分成 20 等份
AMAP,1,1,4,3,                                !映射网格划分
! (5) 施加载荷并求解
/SOLU                                !进入求解模块
ANTYPE,TRANS                                !定义分析类型
TUNIF,-1,                                !设置参考温度

```

LSEL,S,,,1,3,1	!选择线 1,2,3
NSLL,S,1	!选择线上的节点
SF,ALL,CONV,12.5,25	!在选中的节点上施加对流载荷
DELTIM,300,300,800	!定义求解时间选项
OUTRES,ALL,ALL	
AUTOTS,1	
TIME,48000	!定义求解时间
ALLSEL	
SOLVE	!求解
FINISH	!退出求解模块
! (6) 进入一般后处理, 查看结果	
/POST1	!进入后处理模块
SET,, ,1, ,39420	!读取时间为 39420s 时的求解结果
PLNSOL, TEMP	!绘制温度等值线图
SET, LAST	!读取终点时的求解结果
PLNSOL, TEMP	!绘制温度等值线图
/POST26	!进入/POST26 处理模块
/AXLAB,X,temp	
/AXLAB,Y,time	!定义 X 和 Y 坐标标题
NSEL,S,LOC,X,0	
NSEL,R,LOC,Y,0.01	!选择节点 A
*GET,POINTA,NODE,,NUM,MAX	!选择节点 A 的数据
NSOL,2,POINTA,TEMP	!获取节点 A 温度随时间变化的数据
PLVAR,2	!绘制曲线图
FINISH	!退出

## 4.6 热-结构耦合场分析

单纯的热应力分析在实际工程应用中比较少见,通常都是耦合场的分析。一个结构在加热或冷却时,由于膨胀系数不匹配,就会发生膨胀或收缩,从而导致热应力的产生。

### 4.6.1 热-结构耦合场概述

本节介绍热-结构耦合场分析。分析耦合场的方法大致分为:直接耦合方法和间接耦合方法两种。直接耦合方法是利用包含所有必须自由度的耦合单元类型,仅通过一次求解就能得到耦合场的方法;间接耦合方法是按照顺序进行两次或多次的相关场分析(如热-结构场耦合,将先求解温度场,再将温度场求解结果施加到结构场,进行结构场分析),俗称假耦合。本节着重介绍直接耦合方法的实例分析。直接耦合方法的关键是选取适当的耦合场单元,其分析步骤和单场分析相似。

## 4.6.2 实例分析：压力容器热-结构耦合分析

### 1. 问题描述

本例题分析压力容器在内压及温度载荷共同作用下的瞬态应力和温度响应，如图 4-69 所示，可用轴对称分析，其示意图如图 4-70 所示。建模过程中，几何尺寸单位为 mm，弹性模量单位为 MPa。

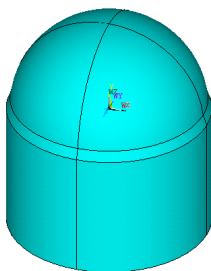


图 4-69 压力容器结构示意图

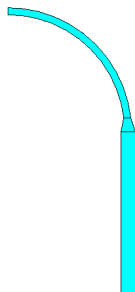


图 4-70 轴对称分析示意图

瞬态分析工况：

- (1) Time, 1e-3: 内壁压力为 6MPa。
- (2) Time, 180: 内壁温度为 21℃，内壁压力为 10MPa。
- (3) Time, 20 000: 内壁温度为 177℃，内壁压力为 12MPa。
- (4) Time, 59 500: 内壁温度为 290.8℃，内壁压力为 15MPa。

### 2. 建立工作文件名和工作标题

#### 1) 定义工作文件名

依次单击：Utility Menu→File→Change Jobname，弹出“Change Jobname”对话框，在“[/FILNAM] Enter new jobname”选项的输入栏中输入工作文件名“EX4-5”，勾选“New log and error files”选项的复选框，设置为“Yes”，然后单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流：

```
/FILNAME,EX4-5
```

#### 2) 定义工作标题

依次单击：Utility Menu→File→Change Title，弹出“Change Title”对话框，在“[/TITLE] Enter new title”选项的输入栏中输入“Thermal\_Structure\_Pressure Vessels”，然后单击“OK”按钮。

对应命令流：

```
/TITLE,Thermal_Structure_Pressure Vessels
```

#### 3) 定义单位制

在命令栏输入窗口中输入“/UNITS, SI”，采用国际单位制。

对应命令流:

```
UNITS, SI
```

### 3. 模型参数设定

依次单击: Utility Menu→Parameters→Scalar Parameters, 弹出“Scalar Parameters”拾取对话框, 在其输入栏分别输入筒体内半径 (R1=775)、筒体厚度 (T1=100) 等, 参见命令流。

对应命令流:

```
R1=775          !筒体内半径
T1=100          !筒体厚度
R2=800          !球壳内半径
T2=48           !球壳厚度
L=95            !筒体削边长度
LC=1200         !筒体长度
E=2e5           !材料弹性模量
NU=0.3          !材料泊松比
NT=5            !厚度方向剖分数
NS=30           !球壳经向剖分数
NC=30           !筒体轴向剖分数
NL=5            !过渡段剖分数
RA=0.6          !剖分比例
```

### 4. 定义单元类型

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add→Edit→Delete, 弹出“Element Types”拾取对话框。单击“Add...”按钮, 弹出“Library of Element Types”对话框, 在“Library of Element Types”选项的左列表框中选择“MagneticVector”, 右列表框中选择“Vector Quad 4nod13”, 在“Element type reference number”选项的输入栏中输入“1”(默认), 单击“OK”按钮关闭该对话框, 单击“Element Types”拾取对话框中的“Close”按钮。

对应命令流:

```
ET,1,13,4,,1
```

### 5. 定义材料参数

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Material Models, 弹出“Define Material Model Behavior”对话框。依次设置材料在不同温度下的弹性模量、密度、泊松比、热传导系数、热膨胀系数、比热容等参数。

对应命令流:

```
MPTEMP,1,20,50,100,150,200,250      !温度范围
MPDATA,EX,1,1,2.1e5,2.5e5,2.2e5,1.9e5,1.89e5,1.85e5  !弹性模量
MPDATA,DENS,1,1,7.5e-6,7.5e-6,7.5e-6,7.5e-6,7.5e-6  !密度
MPDATA,NUXY,1,1,0.3,0.3,0.3,0.3,0.3,0.3             !泊松比
```

MPDATA,KXX,1,1,37.5e-3,38.4e-3,39.7e-3,40.3e-3,40.0e-3,39.3e-3	!热传导系数(W/(m·K))
MPDATA,ALPX,1,1,11.22e-6,11.63e-6,12.32e-6,12.86e-6,13.64e-6,14.27e-6	!热膨胀系数
MPDATA,C,1,1,447.1,460.3,484,503.6,523.9,547.1	!比热容

## 6. 生成几何模型及划分网格

### 1) 生成几何模型

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Circle→Partial Annulus, 弹出“Part Annular Circ Area”对话框, 在“Rad-1”选项的输入栏中输入“R2”、“Theta-1”选项的输入栏中输入“0”、“Rad-2”选项的输入栏中输入“R2+T2”, “Theta-2”选项的输入栏中输入“90”, 然后单击“OK”按钮, 生成球壳部分子午面。

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Rectangle→By 2 Corners, 弹出“Create Rectangle by 2 Corners”对话框, 在“WPx”选项的输入栏中输入“R1”、“WPx”选项的输入栏中输入“0”、“Width”选项的输入栏中输入“T1”、“Height”选项的输入栏中输入“-LC+L”。将工作平面绕  $x$  轴旋转-90°, 沿  $z$  轴移动  $L$ 。

选择球壳部分子午面 A1, 依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Divide→Area by WrkPlane, 弹出“Divide Area by WrkPlane”对话框, 将 A1 分割, 删除面 A4。由关键点 7、8、9、10 生成过渡段子午面, 其几何模型示意图如图 4-71 所示。

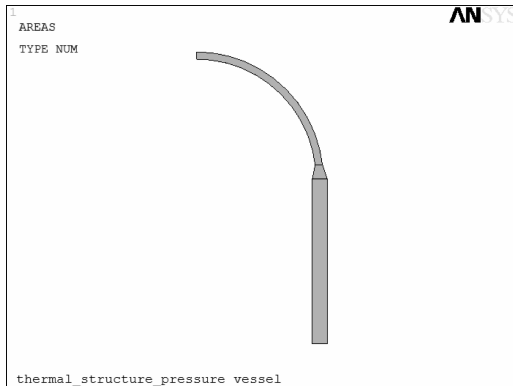


图 4-71 图形显示几何模型示意图

对应命令流:

CYL4,,,R2,0,R2+T2,90	!生成球壳部分子午面
BLC4,R1,0,T1,-LC+L	!生成筒体部分子午面
WPROT,,-90	!旋转工作平面
WPOFF,,,L	!移动工作平面
ASEL,S,LOC,Y,0,R2+T2	!选择球壳部分子午面
ASBW,ALL	!用工作平面分割球壳部分子午面
ASEL,S,LOC,Y,0,L	!选择应删除的球壳部分
ADELE,ALL,,,1	!删除球壳应删除的部分

K1=KP(R1,0,0)	!提取定义过渡段的节点 1
K2=KP(R1+T1,0,0)	!提取定义过渡段的节点 2
KSEL,S,LOC,Y,L	
*GET,K3,KP,,NUM,MIN	!提取过渡段的节点 3
*GET,K4,KP,,NUM,MAX	!提取过渡段的节点 4
ALLS	!全选
A,K1,K2,K3,K4	!生成过渡段子午面

## 2) 划分网格

选择与壁厚相关的线段 L2、L5、L7、L11，设置单元数为 NT，如图 4-72 所示。选取线段 L8，设置单元数为 NC，Spacing ratio 为 1/RA。选取线段 L6，设置单元数为 NC，Spacing ratio 为 RA。选取线段 L9、L10，设置单元数为 NS，Spacing ratio 为 RA。选取线段 L1、L3，设置单元数为 NL。依次单击：Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Areas→Free，弹出“Mesh Area”对话框，单击“Pick All”按钮，对所有面进行单元划分，网格模型示意图如图 4-73 所示。

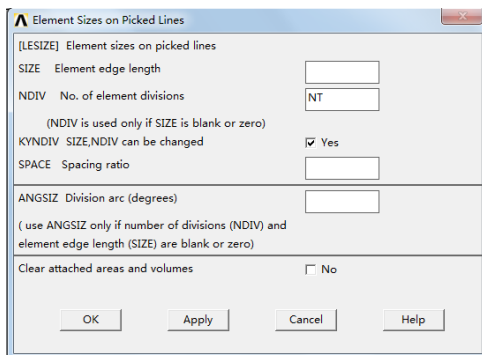


图 4-72 “Element Sizes on Picked Lines”对话框

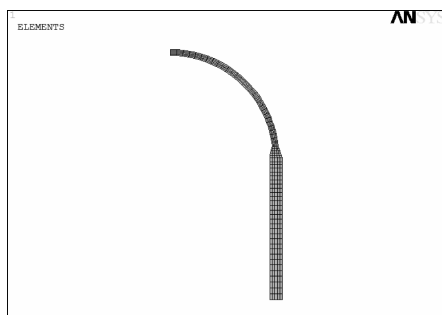


图 4-73 图形显示网格模型示意图

对应命令流：

LSEL,S,LOC,Y,-LC+L	! 网格剖分
LSEL,A,LOC,Y,0	!选择与壁厚相关的线段
LSEL,A,LOC,Y,L	



LSEL,A,LOC,X,0	
LESIZE,ALL,,,NT,,,,,1	!设定壁厚方向的剖分数
LSEL,S,LENGTH,,LC-L	!选择筒体内壁经向线段
LSEL,R,LOC,X,R1	
LESIZE,ALL,,,NC,1/RA,,,,,1	!设定筒体内壁经向线段的剖分数
LSEL,S,LENGTH,,LC-L	!选择筒体外壁经向线段
LSEL,R,LOC,X,R1+T1	
LESIZE,ALL,,,NC,RA,,,,,1	!设定筒体外壁经向线段的剖分数
LSEL,S,RADIUS,,R2	!选择球壳内外壁经线线段
LSEL,A,RADIUS,,R2+T2	
LESIZE,ALL,,,NS,RA,,,,,1	!设定球壳内外壁经线线段剖分数
LSEL,S,LOC,Y,0,L	!选择过渡段内外壁经线线段
LSEL,U,LOC,Y,0	
LSEL,U,LOC,Y,L	
LESIZE,ALL,,,NL,,,,,1	!设定过渡段内外壁经线线段剖分数
ALLS	
AMESH,ALL	!网格剖分

## 7. 求解及结果显示

本例求解过程中没有编写载荷文件，而是根据载荷-时间关系，分4步求解。

### 1) 第1步：载荷步结束时间 $1e-3$ ，即 0.001

选择求解类型为“Transient”瞬态求解，依次单击：Main Menu→Preprocessor→Loads→Analysis Type→New Analysis。约束桶底线段 L5 上全部节点  $y$  方向位移自由度，约束上端线段 L4 上全部节点  $x$  方向自由度。选取内壁线段 L2、L3、L8、L10，再选取这些线段上的节点，将选取的节点设为组建  $n\_in$ 。在组建上施加内压 6MPa。施加载荷的 GUI 操作路径：Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Structural→Pressure→On Node Components。设置参考温度为  $20^{\circ}\text{C}$ ，GUI 操作路径：Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Settings→Reference Temp。设置瞬态非线性求解选项，设置载荷步结束时间为  $1e-3$ ，其余参数按照图 4-74 所示设置。设置完成后，依次单击以下路径求解：Main Menu→Solution→Solve→Current LS。

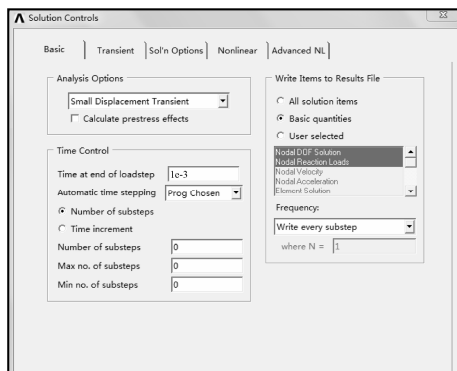


图 4-74 “Solution Controls”对话框

对应命令流:

```

/SOLU
NSEL,S,LOC,Y,-LC+L      !选择筒体底端各节点
D,ALL,UY                !施加轴向位移约束
NSEL,S,LOC,X,0          !选择球壳对称面上的各节点
D,ALL,UX                !施加水平方向位移约束
ALLSEL
ANTYPE,TRANS            !设置分析类型为瞬态
OUTRES,BASIC,ALL        !设置结果输出选项
TREF,20                 !设置参考温度
TIME,1e-3               !第 1 步载荷步结束时刻
SF,N_IN,PRES,6          !在内壁节点施加载荷
SOLVE                   !求解
  
```

结果显示,进入一般后处理,GUI 操作路径: Main Menu→General Postproc。显示结构节点的温度分布和应力分布,GUI 操作路径: Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu,弹出“Contour Nodal Solution Data”对话框,在“DOF Solution”选项的下拉列表中选择“Nodal Temperature”,显示节点温度;在“Stress”选项的下拉列表中选择“von mises sress”,显示节点等效应力。第 1 步载荷下的结构的温度分布和应力分布分别如图 4-75 和 图 4-76 所示。

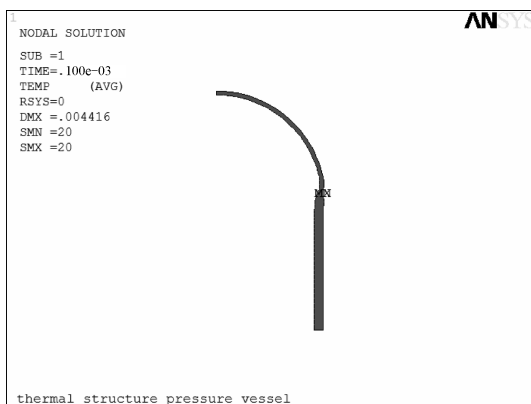


图 4-75 图形显示 Time=1e-3 时温度分布

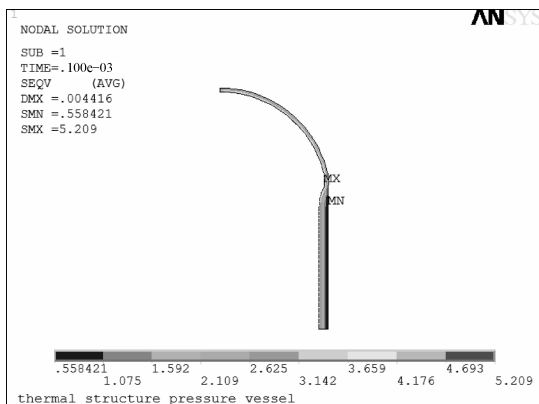


图 4-76 图形显示 Time=1e-3 时应力分布

## 2) 第 2 步: 载荷步结束时间 180

不需关闭软件,直接进行下面的设置。与第 1 步一样,对模型设置相同的约束条件。求解选项如图 4-77 所示设置。在“Basic”选项卡下设置载荷步结束时间为 180、打开自动时间步长、结果输出选项为“Basic quantities”;在“Transient”选项卡下选择“transient effects”和“Stepped loading”;在“Nonlinear”选项卡下,在“DOF solution predictor”选项的下拉列表中选择“on for all substp”。按照第 1 步的操作方法设置参考温度为 20℃,内壁压力为 10MPa。施加内壁温度为 21℃,GUI 操作路径: Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Thermal→Temperature→On Nodes。完成以上设置后求解。

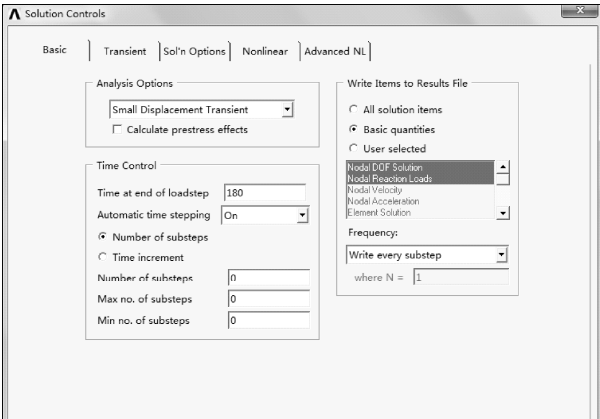


图 4-77 “Solution Controls” 对话框

对应命令流:

```
/SOLU
NSEL,S,LOC,Y,-LC+L      !选择筒体底端各节点
D,ALL,UY                !施加轴向位移约束
NSEL,S,LOC,X,0           !选择球壳对称面上的各节点
D,ALL,UX                !施加水平方向位移约束
ANTYPE,TRANS
ALLSEL
OUTRES,BASIC,ALL
TREF,20
PRED,ON,,ON              !打开预测矫正
TIMINT,ON,THERM          !打开瞬态效应
AUTOTS,ON
TIME,180                 !第 2 步载荷结束时间
D,N_IN,TEMP,21           !施加内壁温度载荷为 21℃
SF,N_IN,PRES,10          !施加内壁压力载荷为 10MPa
SOLVE
```

结果显示: 按照第 1 步结果显示方法, 显示第 2 步载荷下的结构的温度分布和应力分布分别如图 4-78 和图 4-79 所示。

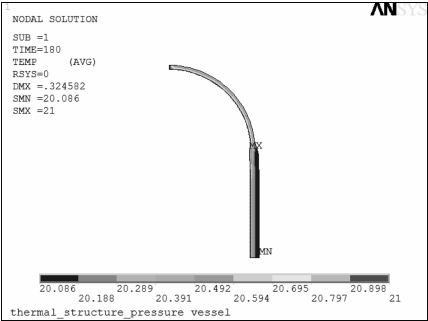


图 4-78 图形显示 Time=180 时温度分布

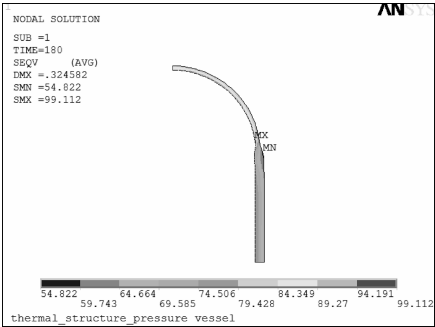


图 4-79 图形显示 Time=180 时应力分布

第3步：载荷步结束时间为 20 000

不需关闭软件，直接进行下面的设置。与第1步一样，对模型设置相同的约束条件。在“Solution Controls”对话框的“Basic”选项卡下设置载荷步结束时间为 20 000、打开自动时间步长、结果输出选项为“Basic quantities”；在“Transient”选项卡下选择“transient effects”和“Stepped loading”；在“Nonlinear”选项卡下，在“DOF solution predictor”选项的下拉列表中选择“on for all substp”。按照第1步的操作方法设置参考温度为 20℃，内壁压力为 12MPa。施加内壁温度为 177℃，GUI 操作路径：Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Thermal→Temperature→On Nodes。完成以上设置后求解。

对应命令流：

NSEL,S,LOC,Y,-LC+L	!选择筒体底端各节点
D,ALL,UY	!施加轴向位移约束
NSEL,S,LOC,X,0	!选择球壳对称面上的各节点
D,ALL,UX	!施加水平方向位移约束
ALLSEL	
ANTYPE,TRANS	
OUTRES,BASIC,ALL	
TREF,20	
TIME,20000	!第3步载荷结束时间
D,N_IN,TEMP,177	!施加内壁温度载荷为 177℃
SF,N_IN,PRES,12	!施加内壁压力载荷为 12MPa
SOLVE	

结果显示：按照第1步结果显示方法，显示第3步载荷下的结构的温度分布和应力分布分别如图 4-80 和图 4-81 所示。

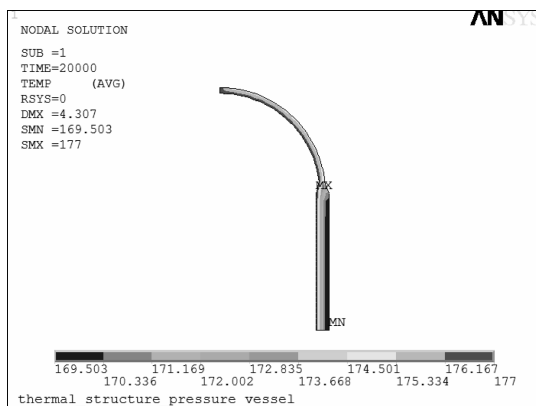


图 4-80 图形显示 Time=20000 时温度分布

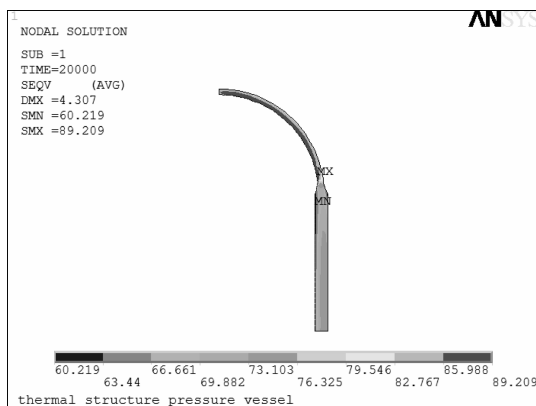


图 4-81 图形显示 Time=20000 时应力分布

第4步：载荷步结束时间为 29 500

不需关闭软件，直接进行下面的设置。与第1步一样，对模型设置相同的约束条件。在“Solution Controls”对话框的“Basic”选项卡下设置载荷步结束时间为 29 500、打开自动时间步长、结果输出选项为“Basic quantities”；在“Transient”选项卡下选择“transient effects”

和“Stepped loading”；在“Nonlinear”选项卡下，在“DOF solution predictor”选项的下拉列表中选择“on for all subsp”。按照第 1 步的操作方法设置参考温度为 20℃，内壁压力为 15MPa。施加内壁温度为 290.8℃，GUI 操作路径：Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Thermal→Temperature→On Nodes。完成以上设置后求解。

对应命令流：

/SOLU	
ANTYPE,TRANS	
NSEL,S,LOC,Y,-LC+L	!选择筒体底端各节点
D,ALL,UY	!施加轴向位移约束
NSEL,S,LOC,X,0	!选择球壳对称面上的各节点
D,ALL,UX	!施加水平方向位移约束
ALLSEL	
OUTRES,BASIC,ALL	
TREF,20	
ALLSEL	
TIME,29500	!第 4 步载荷结束时间
D,N_IN,TEMP,290.8	!施加内壁温度载荷为 290.8℃
SF,N_IN,PRES,15	!施加内壁压力载荷为 15MPa
SOLVE	

结果显示：按照第 1 步结果显示方法，显示第 4 步载荷下的结构的温度分布和应力分布分别如图 4-82 和图 4-83 所示。

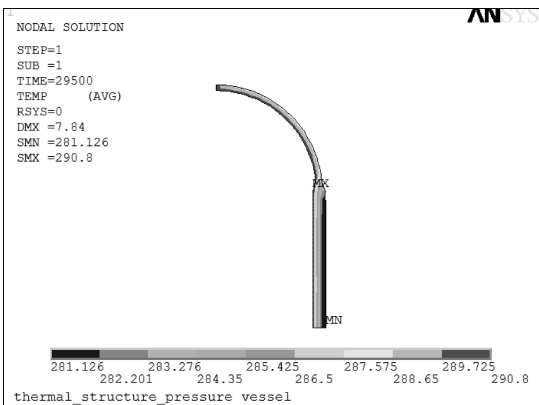


图 4-82 图形显示 TIME=29500 时温度分布

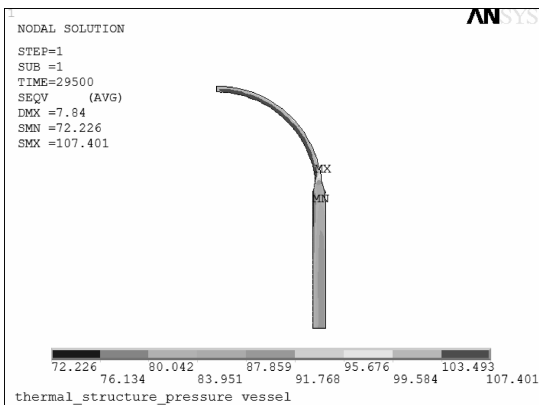


图 4-83 图形显示 TIME=29500 时应力分布图

### 4.6.3 压力容器热-结构耦合分析完整命令流

FINISH	!退出以前模块
/CLEAR, START	!清除系统中数据，读入启动文件设置
/FILENAME,EXER4-5	!指定当前工程的文件名
/TITLE, Thermal_Structure_Pressure Vessel	

```

/UNITS,SI
!***** 参数设定*****
R1=775
T1=100
R2=800
T2=48
L=95
LC=1200
P=16
E=2e5
NU=0.3
NT=5
NS=30
NC=30
NL=5
RA=0.6
!*****前处理*****
/prep7
ET,1,13,4,,1

MPTEMP,1,20,50,100,150,200,250
MPDATA,EX,1,1,1.9e5,2.3e5,2e5,1.9e5,1.8e5,1.7e5
mpdata,dens,1,1,7e-6,7e-6,7e-6,7e-6,7e-6,7e-6
mpdata,nuxy,1,1,0.35,0.35,0.35,0.35,0.35,0.35
mpdata,kxx,1,1,35e-3,36e-3,37e-3,38e-3,37.5e-3,37e-3
mpdata,alpx,1,1,10.5e-6,10.7e-6,11e-6,11.8e-6,12.4e-6,13.2e-6
mpdata,c,1,1,450,460,470,480,490,500

CYL4,,,R2,0,R2+T2,90
BLC4,R1,0,T1,-LC+L
WPROT,,-90
WPOFF,,,L
ASEL,S,LOC,Y,0,R2+T2
ASBW,ALL
ASEL,S,LOC,Y,0,L
ADELE,ALL,,,1
K1=KP(R1,0,0)
K2=KP(R1+T1,0,0)
KSEL,S,LOC,Y,L
*GET,K3,KP,,NUM,MIN
*GET,K4,KP,,NUM,MAX
ALLS
A,K1,K2,K3,K4
!网格剖分

```

!采用国际单位制

!筒体内半径

!筒体厚度

!球壳内半径

!球壳厚度

!筒体削边长度

!筒体长度

!内压

!材料弹性模量

!材料泊松比

!厚度方向剖分数

!球壳经向剖分数

!筒体轴向剖分数

!过渡段剖分数

!剖分比例

!13 号单元用于热结构耦合分析，由

!于瞬态分析同时包含温度变化和压力

!温度范围

!弹性模量

!密度

!泊松比

!热导系数(W/(m·K))

!热膨胀系数

!比热容

!生成球壳部分分子午面

!生成筒体部分分子午面

!旋转工作平面

!移动工作平面

!选择球壳部分分子午面

!用工作平面分割球壳部分分子午面

!选择应删除的球壳部分

!删除球壳应删除的部分

!提取定义过渡段的节点 1

!提取定义过渡段的节点 2

!提取过渡段的节点 3

!提取过渡段的节点 4

!全选

!生成过渡段子午面

```

LSEL,S,LOC,Y,-LC+L                !选择与壁厚相关的线段
LSEL,A,LOC,Y,0
LSEL,A,LOC,Y,L
LSEL,A,LOC,X,0
LESIZE,ALL,,,NT,,,,,1             !设定壁厚方向的剖分数
LSEL,S,LENGTH,,LC-L               !选择筒体内壁经向线段
LSEL,R,LOC,X,R1
LESIZE,ALL,,,NC,1/RA,,,,,1        !设定筒体内壁经向线段的剖分数
LSEL,S,LENGTH,,LC-L               !选择筒体外壁经向线段
LSEL,R,LOC,X,R1+T1
LESIZE,ALL,,,NC,RA,,,,,1          !设定筒体外壁经向线段的剖分数
LSEL,S,RADIUS,,R2                 !选择球壳内外壁经线线段
LSEL,A,RADIUS,,R2+T2
LESIZE,ALL,,,NS,RA,,,,,1          !设定球壳内外壁经线线段剖分数
LSEL,S,LOC,Y,0,L                 !选择过渡段内外壁经线线段
LSEL,U,LOC,Y,0
LSEL,U,LOC,Y,L
LESIZE,ALL,,,NL,,,,,1             !设定过渡段内外壁经线线段剖分数
ALLS
AMESH,ALL                          !网格剖分

lsl,s,,,2
lsl,a,,,10
lsl,a,,,3
lsl,a,,,8
nsl,,1
cm,n_in,node
allsel
FINI
!***** 求解*****
!瞬态求解, 第1步
/solu
NSEL,S,LOC,Y,-LC+L                !选择筒体底端各节点
D,ALL,UY                          !施加轴向位移约束
NSEL,S,LOC,X,0                    !选择球壳对称面上的各节点
D,ALL,UX                          !施加水平方向位移约束
allsel
antype,trans                      !设置分析类型为瞬态
outres,basic,all                  !设置结果输出选项
tref,20                           !设置参考温度
time,1e-3                         !第1步载荷步结束时刻
sf,n_in,pres,6                    !在内壁节点施加载荷
solve                             !求解
/POST1

```

PLNSOL, S,EQV, 0,1.0

!第 2 步

/solu

NSEL,S,LOC,Y,-LC+L

!选择筒体底端各节点

D,ALL,UY

!施加轴向位移约束

NSEL,S,LOC,X,0

!选择球壳对称面上的各节点

D,ALL,UX

!施加水平方向位移约束

antype,trans

allsel

outres,basic,all

tref,20

pred,on,,on

!打开预测矫正

timint,on,therm

!打开瞬态效应

autots,on

time,180

!第 2 步载荷结束时间

d,n\_in,temp,21

!施加内壁温度载荷 21°

sf,n\_in,pres,10

!施加内壁压力载荷 10MPa

solve

/POST1

PLNSOL, S,EQV, 0,1.0

!第 3 步

/solu

NSEL,S,LOC,Y,-LC+L

!选择筒体底端各节点

D,ALL,UY

!施加轴向位移约束

NSEL,S,LOC,X,0

!选择球壳对称面上的各节点

D,ALL,UX

!施加水平方向位移约束

allsel

antype,trans

outres,basic,all

tref,20

time,20000

!第 3 步载荷结束时间

d,n\_in,temp,177

!施加内壁温度载荷 177°

sf,n\_in,pres,10

!施加内壁压力载荷 10MPa

solve

/POST1

PLNSOL, S,EQV, 0,1.0

!第四步

/solu

antype,trans

NSEL,S,LOC,Y,-LC+L

!选择筒体底端各节点

D,ALL,UY

!施加轴向位移约束

NSEL,S,LOC,X,0

!选择球壳对称面上的各节点



```
D,ALL,UX                                !施加水平方向位移约束
allsel
outres,basic,all
tref,20
allsel
time,29500                              !第 4 步载荷结束时间
d,n_in,temp,290.8                       !施加内壁温度载荷 290.8°
sf,n_in,pres,12                         !施加内壁压力载荷 12MPa
solve
/POST1
PLNSOL, S,EQV, 0,1.0
```

## 4.7 工程实例：金刚石膜的残余热应力计算

金刚石膜具有许多优异的性能，使其在机械、电子工业、光学、声学等领域具有广阔的潜在应用前景，但是在金刚石膜中的制备过程中，无论使用何种材料和制备方法，所制备的金刚石膜几乎都处于拉应力或者压应力的状态，残余应力的存在是金刚石膜生产制备过程中的普遍现象，它直接影响金刚石膜沉积生长与金刚石膜在工程实际中的应用性能，是一个亟须解决的问题。为此，将使用有限元分析的方法来获取金刚石膜内的应力分布。

### 4.7.1 问题描述和分析

根据实际的制备情况，对实际物理模型进行适当的简化，其几何模型如图 4-84 所示。选取钼金属作为基体，利用 CVD 法在钼基体上沉积金刚石膜，金刚石膜的弹性模量为 1050 GPa，泊松比为 0.22。钼基体的力学性能参见表 4-4。试利用 ANSYS 获得界面处的轴向正应力  $\sigma_x$  随径向变化的曲线图。

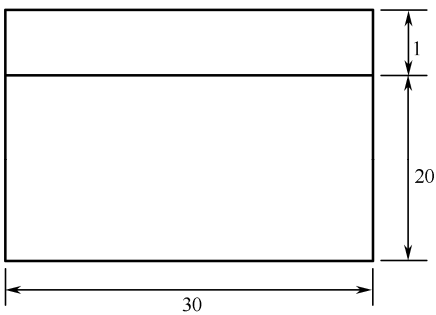


图 4-84 几何模型

表 4-4 铝基体的力学性能

温度/K	弹性模量/GPa	屈服应力/MPa	泊松比	硬化模量/GPa
300	325	330	0.324	31.6
400	313	240	0.324	30.9
600	301	179	0.324	29.7
800	275	140	0.324	27.2
1000	243	127	0.324	24.5
1200	235	120	0.324	23

对于本例，考虑膜/基系统的对称性，取其 1/2 的截面建立模型作为研究对象，并选择 PLANE42 轴对称单元进行求解。

## 4.7.2 求解步骤

### 1. 定义工作文件名和工作标题

#### 1) 定义工作文件名

依次单击: Utility Menu→File→Change Jobname, 弹出“Change Jobname”对话框, 在“[/FILNAM]”选项的输入栏中输入工作文件名“EXER4-6”, 勾选“New log and error files”选项的复选框, 设置为“Yes”, 单击“OK”按钮。

对应命令流:

```
/FILENAME,EXER4-6
```

#### 2) 定义工作标题

依次单击: Utility Menu→File→Change Title, 弹出“Change Title”对话框。在“[/TITLE]”选项的输入栏中输入标题为“YINGLI”, 单击“OK”按钮。

对应命令流:

```
/TITLE,YINGLI
```

### 2. 定义单元类型及材料属性

#### 1) 定义单元类型

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add→Edit→Delete, 弹出“Element Types”拾取对话框, 单击“Add”按钮, 弹出“Library of Element Types”对话框。在“Library of Element Types”选项的左右两个列表中分别选择“Structural Mass”和“Quad 4node 42”, 在“Element type reference number”选项的输入栏中输入“1”, 单击“OK”按钮。

对应命令流:

```
ET,1,PLANE42
```

## 2) 定义单元选项

单击“Element Type”拾取对话框中“Option”按钮，弹出“PLANE42 element type options”对话框，在“Element behavior K3”选项的下拉列表中选择“Axisymmetric”，单击“OK”按钮，弹出“”对话框，单击“Close”按钮，关闭该对话框。

对应命令流：

```
KEYOPT,1,3,1
```

## 3) 设置金刚石膜和基体的材料属性

依次单击：Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models，弹出“Define Material Models Behavior”窗口，双击“Material Model Available”列表框中的“Structural→Linear→Elastic→Isotropic”选项，弹出“Linear Isotropic Properties for Material Number 1”对话框，在“[EX]”选项的输入栏中输入“1.05e12”，在“[NUXY]”选项的输入栏中输入“0.22”，单击“OK”按钮。依次单击：Thermal Expansion→Secant Coefficient→Isotropic，弹出“Thermal Expansion Secant Coefficient for Material Number 1”对话框，单击“Add Temperature”按钮，直到“Temperatures”一栏出现温度 T6 为止，如图 4-85 所示输入数据，单击“OK”按钮。

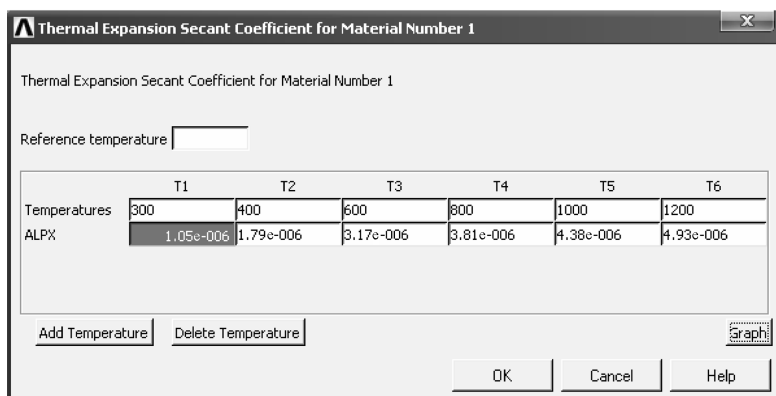


图 4-85 “Thermal Expansion Secant Coefficient for Material Number 1”对话框

选中工具栏中“Material”选项的下拉列表中“New Model”选项，弹出“Define Material ID”拾取对话框，在其文本框中输入“2”。依次单击：Material Model Available→Structural→Linear→Elastic→Isotropic”选项，弹出“Linear Isotropic Properties for Material Number 2”对话框，单击“Add Temperature”按钮，直到“Temperatures”一栏出现温度 T6 为止。如图 4-86 所示输入数据，单击“OK”按钮。依次单击：Thermal Expansion→Secant Coefficient→Isotropic，弹出“Thermal Expansion Secant Coefficient for Material Number 2”对话框，单击“Add Temperature”按钮，直到“Temperatures”一栏出现温度 T6 为止，如图 4-87 所示输入数据，单击“OK”按钮。依次单击：“Structural→Nonlinear→Inelastic→Rate Independent→Kinematic Hardening Plasticity→Mises Plasticity→Bilinear，单击“Add Temperature”按钮，直到“Temperatures”一栏出现温度 T6 为止，如图 4-88 所示输入数据，单击“OK”按钮。

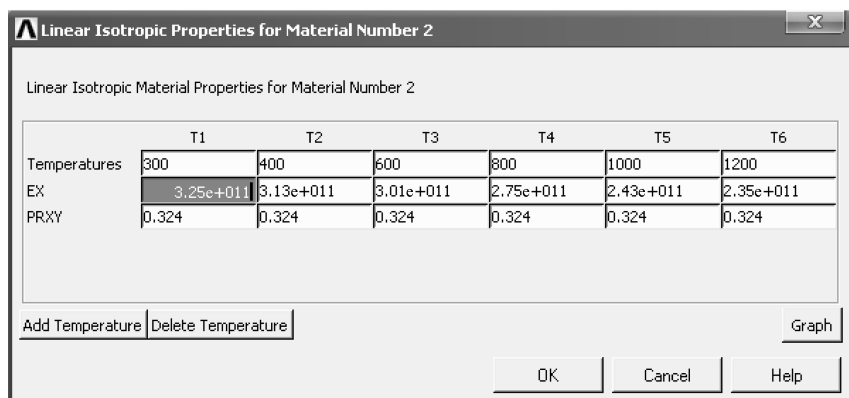


图 4-86 “Linear Isotropic Properties for Material Number 2” 对话框

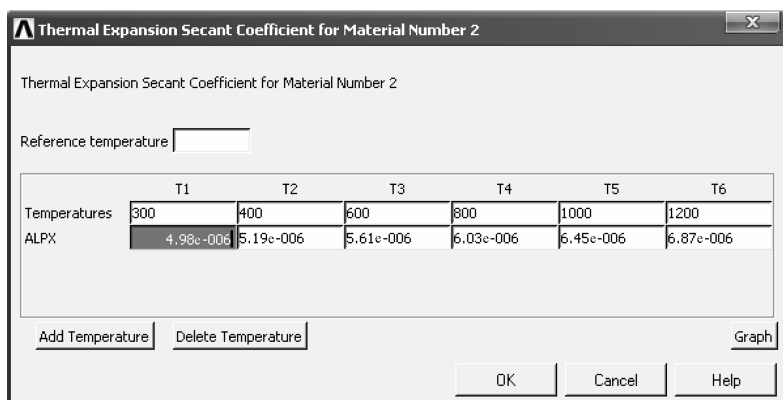


图 4-87 “Thermal Expansion Secant Coefficient for Material Number 2” 对话框

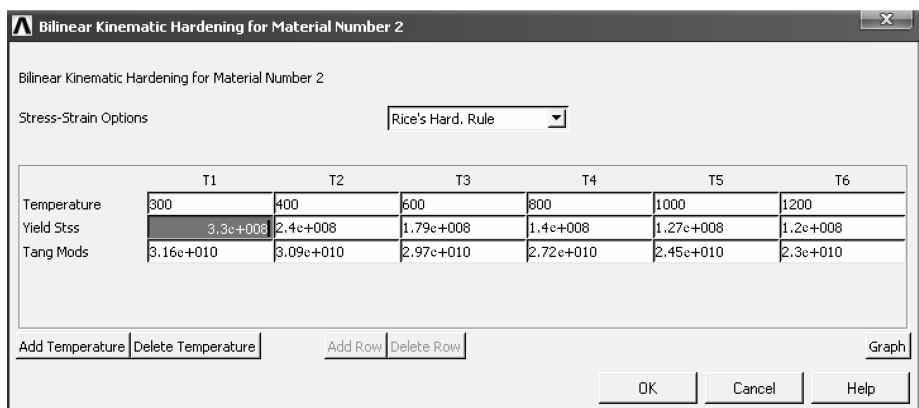


图 4-88 “Bilinear Kinematic Hardening for Material Number 2” 对话框

对应命令流:

```
MP,EX,1,1050e9
MP,NUXY,1,0.22
MPTEMP,1,300,400,600,800,1000,1200
```

```

MPDATA,ALPX,1,1,1.05e-6,1.79e-6,3.17e-6,3.81e-6,4.38e-6,4.93e-6
MPTEMP,1,300,400,600,800,1000,1200
MPDATA,ALPX,2,1,4.98e-6,5.19e-6,5.61e-6,6.03e-6,6.45e-6,6.87e-6
MPTEMP,1,300,400,600,800,1000,1200
MPDATA,eX,2,,325e9,313e9,301e9,275e9,243e9,235e9
MPDATA,PRXY,2,,0.324,0.324,0.324,0.324,0.324,0.324
TB,BkIN,2,6
TBTEMP,300
TBDATA,1,330e6,31.6e9
TBTEMP,400
TBDATA,1,240e6,30.9e9
TBTEMP,600
TBDATA,1,179e6,29.7e9
TBTEMP,800
TBDATA,1,140e6,27.2e9
TBTEMP,1000
TBDATA,1,127e6,24.5e9
TBTEMP,1200
TBDATA,1,120e6,23e9

```

### 3. 建立几何模型

#### 1) 生成面

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Rectangle→By Dimensions, 弹出“Create Rectangle by Dimensions”对话框, 如图 4-89 所示。在“X1,X2 X-coordinates”选项的输入栏中分别输入“0”和“30”; 在“Y1,Y2 Y-coordinates”选项的输入栏中分别输入“0”和“1”, 单击“OK”按钮。重复执行上述步骤生成面 2, 在相应的输入栏中分别输入“0”、“30”和“0”“-20”, 然后单击“OK”按钮。

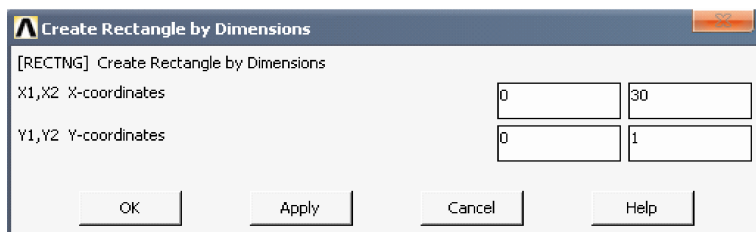


图 4-89 “Create Rectangle by Dimensions”对话框

对应命令流:

```

RECTNG,0,30,0,1
RECTNG,0,30,0,-20

```

#### 2) 将面 A1、A2 合成一个面

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Glue→Areas, 弹出“Glue Areas”拾取对话框, 在其输入栏中输入“1,2”, 单击“OK”按钮。

对应命令流:

```
AGLUE,ALL
```

### 3) 压缩编号

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Numbering Ctrls→Compress Numbers, 弹出“Compress Numbers”对话框, 在“Label Item to be compressed”选项的下拉列表中选择“All”, 单击“OK”按钮。

对应命令流:

```
NUMCMP,ALL
```

## 4. 有限元网格划分

### 1) 选择线段并设置线段等分数

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Ctrls→Manualsize→Lines→Picked lines, 弹出“Element Sizes on Picked Lines”拾取对话框, 在其输入栏中输入“1,5”, 单击“OK”按钮, 弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框, 如图 4-90 所示。在“NDIV No. of element divisions”选项的输入栏中输入“60”, 在“SPACE Spacing ratio”选项的输入栏中输入“0.2”, 单击“OK”按钮。

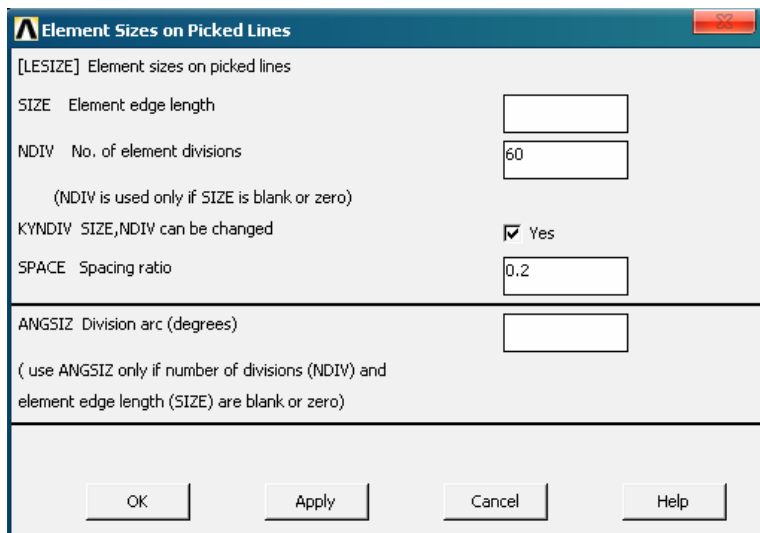


图 4-90 “Element Sizes on Picked Lines”对话框

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Ctrls→Manualsize→Lines→ Picked lines, 弹出“Element Sizes on Picked Lines”拾取对话框, 在其输入栏中输入“3”, 单击“OK”按钮, 弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框, 在“NDIV No. of element divisions”选项的输入栏中输入“60”, 在“SPACE Spacing ratio”选项的输入栏中输入“5”, 单击“OK”按钮。

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Ctrls→Manualsize→Lines→ Picked lines, 弹出“Element Sizes on Picked Lines”拾取对话框, 在其输入栏中输入“6,7”, 单击“OK”

按钮，弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，在“NDIV No. of element divisions”选项的输入栏中输入“40”，在“SPACE Spacing ratio”选项的输入栏中输入“5”，单击“OK”按钮。

依次单击：Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→Manualsize→Lines→ Picked lines，弹出“Element Sizes on Picked Lines”拾取对话框，在其输入栏中输入“2,4”，单击“OK”按钮，弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，在“NDIV No. of element divisions”选项的输入栏中输入“5”，单击“OK”按钮。

对应命令流：

```
LSEL,S,LINE,,1,5,4
LESIZE,ALL,,60,0.2
LSEL,S,LINE,,3
LESIZE,3,,60,5
LSEL,S,LINE,,6,7
LESIZE,ALL,,40,5
LSEL,S,LINE,,2,4,2
LESIZE,ALL,,5
```

## 2) 设置面的材料参考号并划分网格

依次单击：Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→Picked Areas，弹出“Area Attributes”拾取对话框，在其输入栏中输入“1”，单击“OK”按钮，弹出“Area Attributes”对话框，在“[MAT] Material number”选项的输入栏中选择“1”，其他按照默认的设置，单击“Apply”按钮。

再次弹出“Area Attributes”拾取对话框，在其输入栏中输入“2”，单击“OK”按钮，将弹出“Area Attributes”对话框，在“[MAT] Material number”选项的输入栏中选择“2”，其他按照默认的设置，单击“OK”按钮。依次单击：Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Area→Mapped→3 or 4 sided，弹出“Mesh Areas”拾取对话框，在其输入栏中输入“1,2”，单击“OK”按钮，网格划分结果如图 4-91 所示。

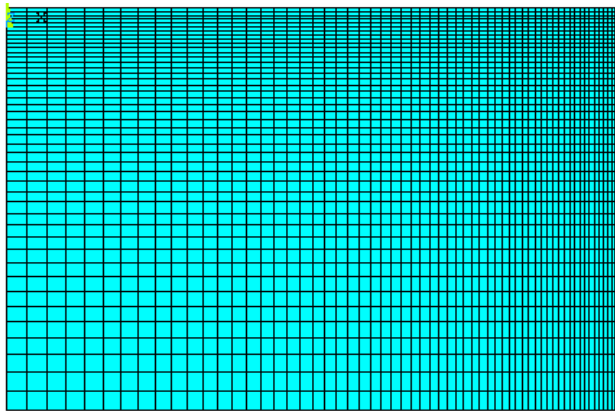


图 4-91 图形显示网格划分结果

```

ASEL,S,,,1
AATT,1,,1,0
ASEL,S,,,2
AATT,2,,1,0
ASEL,S,,,ALL
MSHKEY,1
AMESH,ALL

```

### 3) 保存网格划分结果

依次单击: Utility Menu→File→Save As, 弹出“Save Database”对话框, 在“Save Database to”选项的下拉列表中输入“EXER 4.41.db”, 单击“OK”按钮。

## 5. 施加载荷并求解

### 1) 定义分析类型

依次单击: Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis, 弹出“New Analysis”对话框, 设置分析类型为“Static”, 单击“OK”按钮。

对应命令流:

```
ANTYPE,STATIC
```

### 2) 设置初始温度

依次单击: Main Menu→Solution→Define Loads→Settings→Uniform Temp, 弹出“Reference temperature”对话框, 如图 4-92 所示, 在“[TREF] Reference temperature for thermal strain calculations”中输入: “1173”, 单击“OK”按钮。

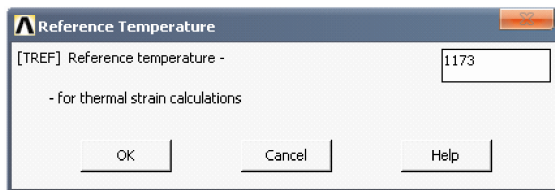


图 4-92 “Reference Temperature”对话框

对应命令流:

```
TREF,1173
```

### 3) 选择线 L4、L6

依次单击: Utility Menu→Select→Entities, 弹出“Select Entities”拾取对话框, 在上面两个下拉列表中分别选择“Lines”和“By Num/Pick”选项, 勾选“From Full”选项的复选框, 单击“OK”按钮, 弹出“Select Lines”拾取对话框, 在其输入栏中输入“4,6”, 单击“OK”按钮。

对应命令流:

```
LSEL,S,,,4,6,2
```



#### 4) 选择所选线上的所有节点

依次单击: Utility Menu→Select→Entities, 弹出“Select Entities”拾取对话框, 在上面两个下拉列表中分别选择“Nodes”和“Attached to”选项, 勾选“Lines all”选项的复选框, 单击“OK”按钮。

对应命令流:

```
NSLL,S,1
```

#### 5) 在节点上施加位移载荷

依次单击: Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→On Nodes, 弹出“Apply U,ROT on Nodes”拾取对话框, 单击“Pick All”按钮, 弹出“Apply U,ROT on Nodes”对话框, 如图 4-93 所示, 在“Lab2 DOFs to be constrained”选项组中选择“UX”, 在“VALUE Displacement value”选项的输入栏中输入“0”, 单击“OK”按钮。

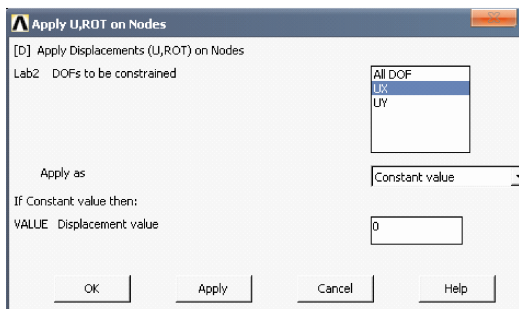


图 4-93 “Apply U,ROT on Nodes”对话框

对应命令流:

```
D,ALL,UX
```

#### 6) 在节点上施加位移载荷

依次单击: Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→On Nodes, 弹出“Apply U,ROT on Nodes”拾取对话框, 在其文本框中输入“368”(或者用鼠标单击选中最右下端的节点), 弹出“Apply U,ROT on Nodes”对话框, 如图 4-94 所示, 在“Lab2 DOFs to be constrained”选项组中选择“UY”, 在“VALUE Displacement value”选项的输入栏中输入“0”, 单击“OK”按钮。

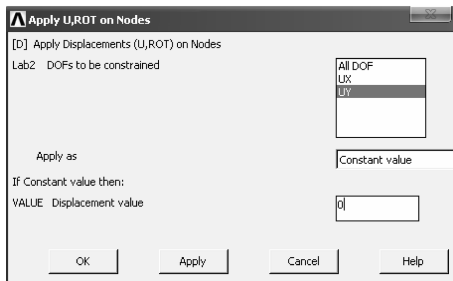


图 4-94 “Apply U,ROT on Nodes”对话框

对应命令流:

```
NSEL,S,,,368
D,368,UY,0
```

#### 7) 选择全部

依次单击: Utility Menu→Select→Entities, 弹出“Select Entities”拾取对话框, 如图 4-95 所示, 在上面两个下拉列表中分别选择“Elements”和“By Num/Pick”选项, 勾选“From Full”的复选框, 单击“OK”按钮, 弹出“Select elements”拾取对话框, 如图 4-96 所示, 在其输入栏中输入“1,2”, 单击“OK”按钮。

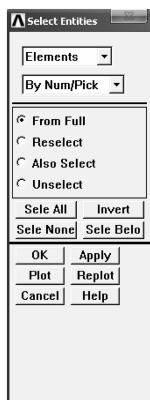


图 4-95 “Select Entities”拾取对话框

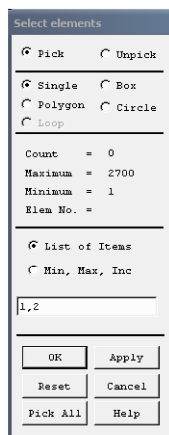


图 4-96 “Select elements”拾取对话框

对应命令流:

```
ESEL,S,MAT,,ALL
```

#### 8) 选择所选单元上的所有节点

依次单击: Utility Menu→Select→Entities, 弹出“Select Entities”拾取对话框, 在上面两个下拉列表中分别选择“Nodes”和“Attached to”选项, 勾选“Element all”的复选框, 单击“OK”按钮。

对应命令流:

```
NSLE,S
```

#### 9) 施加温度载荷

依次单击: Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Thermal→Temperature→On Nodes, 弹出“Apply TEMP on Nodes”拾取对话框, 单击“Pick all”按钮后再单击“OK”按钮, 弹出“Apply TEMP on Nodes”对话框, 如图 4-97 所示。在“Lab2 DOFs to be constrained”下拉列表框中选择“TEMP”选项, 在“VALUE Load TEMP value”文本框中输入“298”, 单击“OK”按钮。

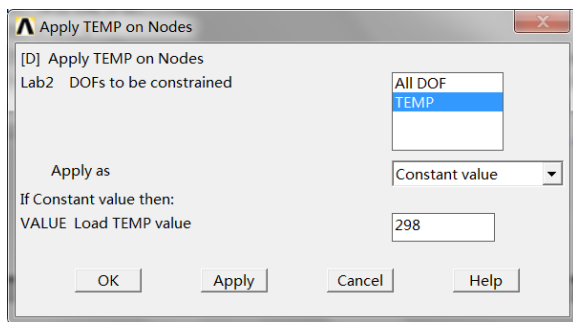


图 4-97 “Apply TEMP on Nodes”对话框

对应命令流:

```
BF,ALL,TEMP,298
```

10) 选择全部

依次单击: Utility Menu→Select→Everything。

对应命令流:

```
ALLSEL
```

11) 求解

依次单击: Main Menu→Solution→Solve→Current LS, 弹出“Solve Current Load Step”对话框, 单击“OK”按钮开始求解, 当弹出“Solution is done”对话框时表示求解完成, 单击“Close”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
SOLVE
```

12) 保存求解结果

依次单击: Utility Menu→File→Save As, 弹出“Save Database”对话框, 在“Save Database to”选项的下拉列表中选择“EXER 4.42.db”, 单击“OK”按钮。

## 6. 进入一般后处理, 查看结果

1) 定义路径

依次单击: Main Menu→General Postproc→Path Operations→Define Path→By Location, 弹出“By Location”对话框, 如图 4-98 所示。在“Name Define Path Name”选项的输入栏中输入“A0”, 其他选项按照默认方式设置, 单击“OK”按钮。弹出“By Location in Global Cartesian”对话框, 在“NPT Path point number”选项的输入栏中输入“1”, 在“X,Y,Z Location in Global CS”选项的输入栏中输入“0”、“0”和“0”, 单击“OK”按钮。再次弹出“By Location in Global Cartesian”对话框, 在“NPT Path point number”选项的输入栏中输入“2”, 在“X,Y,Z Location in Global CS”选项的输入栏中输入“30”, “0”和“0”, 单击“OK”按钮。

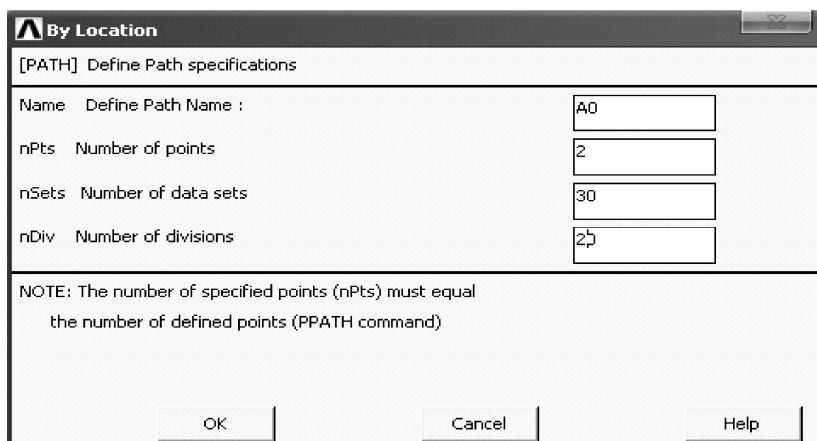


图 4-98 “By Location”对话框

对应命令流:

```
PATH,A0,2,10,30
PPATH,1,0,0,0,0,0
PPATH,2,0,30,0,0,0
```

## 2) 查看应力分布图

依次单击: Main Menu→General Postproc→Path Operations→Map onto Path, 弹出“Map Result Items onto Path”对话框, 如图 4-99 所示进行设置, 单击“OK”按钮。依次单击: Main Menu→General Postproc→Path Operations→Plot Path Item→On Graph, 弹出“Plot of Path Items on Graph”拾取对话框, 在其选项组中选择“A0SX”选项, 单击“OK”按钮, 窗口中将会显示出应力分布图, 如图 4-100 所示。

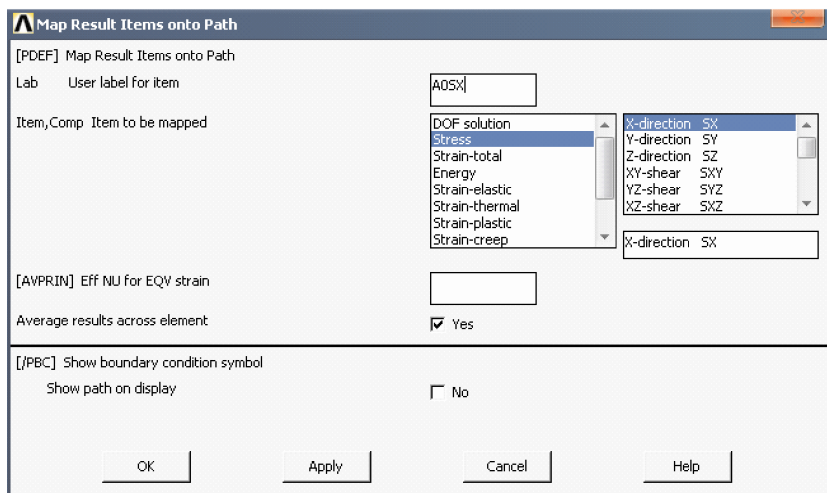


图 4-99 “Map Result Items onto Path”对话框



```

MPTEMP,1,300,400,600,800,1000,1200      !建立温度参数表
MPDATA,EX,2,,325e9,313e9,301e9,275e9,243e9,235e9
                                           !输入材料 2 弹性模量
MPDATA,PRXY,2,,0.324,0.324,0.324,0.324,0.324,0.324
                                           !输入材料 2 泊松比

TB,BkIN,2,6
TBTEMP,300
TBDATA,1,330e6,31.6e9
TBTEMP,400
TBDATA,1,240e6,30.9e9
TBTEMP,600
TBDATA,1,179e6,29.7e9
TBTEMP,800
TBDATA,1,140e6,27.2e9
TBTEMP,1000
TBDATA,1,127e6,24.5e9
TBTEMP,1200
TBDATA,1,120e6,23e9                      !用双线型模型模拟材料 2 的弹塑性行为
! (4) 建立几何模型、有限元网格划分
RECTNG,0,30,0,1                          !建立矩形面 1
RECTNG,0,30,0,-20                        !建立矩形面 2
AGLUE,ALL                                 !粘贴面 1 和 2
NUMCMP,ALL                                !压缩面编号
APLOT                                     !显示面
ASEL,S,,,1
AATT,1,,1,0                              !选择面 1, 并赋予材料属性 1
ASEL,S,,,2
AATT,2,,1,0                              !选择面 2, 并赋予材料属性 2
LSEL,S,LINE,,1,5,4
LESIZE,ALL,,,60,0.2                      !选择线 1 和 5, 并将其划分成 60 等份
LSEL,S,LINE,,3
LESIZE,3,,,60,5                          !选择线 3, 并将其划分成 60 等份
LSEL,S,LINE,,6,7
LESIZE,ALL,,,40,5                        !选择线 6 和 7, 并将其划分成 40 等份
LSEL,S,LINE,,2,4,2
LESIZE,ALL,,,5                           !选择线 2 和 4, 并将其划分成 5 等份
ASEL,S,,,ALL
MSHKEY,1
AMESH,ALL                                !将面 1 和 2 进行映射网格划分
FINISH                                   !退出前处理模块
! (5) 旋加载荷并求解
/SOLU                                    !进入求解模块
ANTYPE,STATIC                            !定义求解类型
LSEL,S,,,4,6,2

```

```
NSLL,S,1                                !选择线 4 和 6 上的所有节点
D,ALL,UX                                !对其施加 x 向约束
NSEL,S,,,368
D,368,UY,0                              !对节点 2 施加 y 向约束
TREF,1173                              !参考温度为 1173
ESEL,S,MAT,,ALL
NSLE,S
BF,ALL,TEMP,298                        !在模型上施加温度载荷 298
ALLSEL                                  !选择所有
SOLVE                                   !求解
! (6) 进入一般后处理, 查看结果
/POST1
PATH,A0,2,10,30
PPATH,1,0,0,0,0,0
PPATH,2,0,30,0,0,0                    !定义路径 y=0.0
PDEF,A0SX,S,X,NOAVG                  !获取路径上的正应力数据
PLPATH,A0SX                            !显示其正应力随径向变化曲线图
FINISH                                 !退出后处理模块
```

## 本章小结

本章主要介绍了热力学分析基本过程,包括建立几何模型和网格划分,加载求解,以及结果分析。详细介绍了稳态热分析、瞬态热分析、辐射热分析和相变热分析的定义,以及在 ANSYS 中常用的单元,并且分别给出了相应的分析实例。在综合实例中,将金刚石膜内残余热应力的计算作为一个工程实例进行展开求解。

通过本章的学习,可以了解 ANSYS 热单元属性的选择和设置,加强对不同热力学分析方法的认识,掌握常用的热力学模型的几何建模、网格划分、加载求解及结果分析的能力。

## 思考题

(1) 热力学分析基本过程包括哪几个阶段?

(2) 对比本章前 4 个实例(4.2 节至 4.5 节),分析步骤中哪些地方是相同的,哪些地方是不同的,区别在哪里?

(3) 本章中选择的大部分例题模型皆利用面对称,通过选择其横截面的一半建模求解,这样可以提高计算效率,节约时间,但也可以通过建立三维模型进行求解,请以相变分析所给的数据为例,建立其 1/8 的三维模型并加载求解并对比与书上所给方法的求解结果。

## 常见疑难问题解析

在本章的实例操作过程中，或者在做其他 ANSYS 练习可能会遇到的一些问题，结合本章内容汇总如下。

(1) ANSYS 热力学分析过程中定义的初始温度 (Initial Condition)、参考温度 (Reference Temp) 和均匀温度 (Uniform Temp) 的区别。

初始温度是对相应节点施加分析一开始时用到的 (初始) 温度，只在开始有效，后面将被实际计算所得的温度替代；初始均匀温度仅对分析的第一个子步有效，而设定节点温度 (D 命令) 将保持贯穿整个瞬态分析过程，除非删除此约束。

参考温度是没有定义初始温度时，在分析的第一个子步给模型施加的一个均匀温度场的温度；参考温度主要用于热应力分析的参考基准，因为求热应力需要先求温度差，求温度差就需要这个参考温度作为减数。

均匀温度是在热分析中，与初始温度、参考温度作用相同。如果初始温度场是均匀的，三者都可以；如果不均匀，就要定义初始温度 (不同的节点定义不同的初始温度)；在结构分析/热应力分析中，均匀温度与参考温度的作用相同，由其确定材料的热相关性质 (线膨胀系数)。

(2) 划分网格时，如果类似出现 “Shape testing revealed that 16 of the 30 new or modified elements violate shape warning limits. To review test results, please see the output file or issue the CHECK command.” 怎么改？

首先检查单元 `prep7`→`meshing`→`check mesh`，若有不合格的单元，用别的办法重新划分单元。还可以设 `limits`，有时这种警告对结果并没有多大的影响，完全根据经验，如果可以进行下去则可忽略该警告。一般来说，温度场分析对形状测试更严格一些，其一般不会对问题产生太大影响，可通过划分更密的网格来解决。





## 第 5 章 动力学分析



### 知识点

- 动力学分析简介
- 模态分析
- 谐响应分析
- 瞬态动力学分析
- 谱分析

### 5.1 动力学分析简介

结构动力分析研究结构在动载荷作用下的响应，以确定结构的承载能力和动力特性。静力分析也许能确保一个结构可以承受稳定载荷，但这还远远不够，著名的美国塔科马海峡吊桥（Tacoma Narrows Bridge）在 1940 年 11 月 7 日，也就是在它刚建成 4 个月后，受到风速为 67.6km 的平稳载荷时发生了倒塌。动力学主要分析 4 种物理现象：振动、冲击、交变作用力和地震载荷。而上述每一种情况在 ANSYS 中都由一个特定的动力学分析类型来处理。

#### 1. 模态分析

模态分析可以确定设计中的结构或机器部件的振动特性，也可以作为瞬态动力学分析、谐响应分析、谱分析等动力学分析的起点。模态分析是一种线性分析，非线性特性将被忽略，但 ANSYS 可以分析包含预应力、流固耦合等非线性因素的结构进行模态分析。模态分析中模态的提取方法有 7 种，即分块兰索斯法、子空间迭代法、缩减法、PowerDynamics 法、非对称法、阻尼法和 QR 阻尼法，默认时采用分块兰索斯法。

#### 2. 谐响应分析

谐响应分析用来确定线性结构在承受随时间按简谐规律变化载荷时的稳态响应，可以预测结构的持续动力特性，克服共振、疲劳等有害效果，但不能考虑瞬态振动。谐响应分析是一种线性分析，但在分析中可以包含非对称系统矩阵，如分析流体-结构相互作用问题。谐响应分析求解方法共 3 种，即完全法、缩减法和模态叠加法。

### 3. 瞬态动力学分析

瞬态动力学分析用于确定承受任意随时间变化的载荷的结构动力学响应，可以确定结构在静载荷、瞬态载荷和简谐载荷的随意组合下的结构位移、应变、应力及力响应。瞬态动力学分析求解方法可以为完全法、缩减法和模态叠加法中的任意一种。采用完全法，即采用完整的系统矩阵计算瞬态响应，可包括各类非线性特性；模态叠加法是采用模态分析得到的振型对振动系统中的各个系数对角化解耦，模态截断后近似计算结构的响应；缩减法则通过确定主自由度和缩减矩阵，在主自由度的位移计算出来后，再将解扩展到原有的完整自由度集上，分布计算结构的响应。

### 4. 谱分析

谱分析是将模态分析的结构与一个已知的谱联系起来计算模型位移和应力的一种分析技术。它主要应用在时间历程分析上，以便确定结构对随机载荷或随时间变化载荷（如地震、风载、海洋波浪、喷气发动机推力、火箭发动机振动等）的动力响应情况。所谓谱，就是谱值与频率的关系图，它表达了时间历程载荷的强度和频率。谱分析有 3 种形式：响应谱分析方法、动力设计分析方法和功率谱密度方法。只有线性行为在谱分析中才是有效的，任何非线性单元均作为线性处理。如果含有接触单元，则其刚度始终是初始刚度；并且必须定义材料弹性模量和密度，材料的任何非线性将被忽略，但允许材料特性是线性、各向同性或各向异性及随温度变化或不随温度变化。

## 5.2 模态分析

模态分析可以确定设计中的结构或机器部件的振动特性，也可以作为瞬态动力学分析、谐响应分析、谱分析等动力学分析的起点。模态分析是一种线性分析，非线性特性将被忽略，但 ANSYS 可以对包含预应力、流固耦合等非线性因素的结构进行模态分析。

### 5.2.1 概述

ANSYS 软件中的模态分析是很重要的动力计算的一部分。模态分析是所有动力学分析类型的最基础的内容。由于模态分析有助于在其他动力分析中估算、求解、控制参数，所以，在准备进行其他的动力分析之前，首先都要进行结构的模态分析。

### 5.2.2 实例分析一：桁架桥模态分析

#### 1. 问题描述

桁架桥示意图如图 5-1 所示，已知下承式简支钢桁架桥长为 72m，每个节段为 12m。

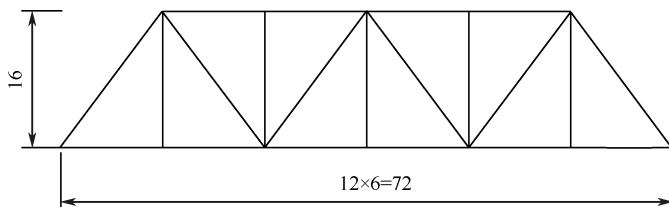


图 5-1 桁架桥示意图

## 2. 建立工作文件名和工作标题

### 1) 定义工作文件名

依次单击: Utility Menu→File→Change Jobname, 弹出“Change Jobname”对话框, 在“[FILNAM] Enter new jobname”选项的输入栏中输入工作文件名“EX5-1”, 勾选“New log and error files”选项的复选框, 设置为“Yes”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
/FILENAME, EX5-1
```

### 2) 定义工作标题

依次单击: Utility Menu→File→Change Title, 弹出“Change Title”对话框, 在“[/TITLE] Enter new title”选项的输入栏中输入“Truss”, 单击“OK”按钮。

对应命令流:

```
/TITLE, Truss
```

### 3) 定义单位制

在命令栏输入窗口中输入“/UNITS, SI”, 采用国际单位制。

对应命令流:

```
/UNITS, SI
```

## 3. 定义单元类型及实常数

### 1) 定义单元类型

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add→Edit/Delete, 弹出“Element Types”拾取对话框。单击“Add...”按钮, 弹出“Library of Element Types”对话框, 在“Library of Element Types”选项的左列表框中选择“Structural→Link”, 右列表框中选择“2D spar 1”, 在“Element type reference number”选项的输入栏中输入“1”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。单击“Element Types”拾取对话框中的“Close”按钮, 继续单击“Add...”按钮, 弹出“Library of Element Types”对话框, 在“Library of Element Types”选项的左列表框中选择“Structural→shell”, 右列表框中选择“Elastic 4node 63”, 在“Element type reference number”选项的输入栏中输入“2”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。单击“Element Types”拾取对话框中的“Close”按钮退出单元设置。

对应命令流:

```
ET,1,4
ET,2,63
```

## 2) 定义实常数

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Real Constants→Add→Edit/Delete, 弹出“Real Constants”拾取对话框, 单击“Add...”按钮, 弹出“Element Type for Real Constants”对话框, 单击“OK”按钮, 弹出“Real Constant Set Number 1,for beam4”对话框, 在“AREA”, “IZZ”, “IYY”和“TKZ”选项的输入栏中分别输入“3”, “2”, “2”和“2”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。单击“Real Constants”拾取对话框中“Close”按钮关闭该对话框, 退出实常数设置。

再依次单击: Main Menu→Preprocessor→Real Constants→Add→Edit/Delete, 弹出“Real Constants”拾取对话框, 单击“Add...”按钮, 弹出“Element Type for Real Constants”对话框, 单击“OK”按钮, 弹出“Real Constant Set Number 2,for shell”对话框, 在“TK(I)”, “TK(J)”, “TK(K)”和“TK(L)”选项的输入栏中分别输入“0.3”, “0.3”, “0.3”和“0.3”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。单击“Real Constants”拾取对话框中“Close”按钮关闭该对话框, 退出实常数设置。

对应命令流:

```
R,1,3,2,2,2
R,2,0.3,0.3,0.3,0.3
```

## 4. 定义材料性能参数

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Material Models, 弹出“Define Material Model Behavior”对话框。在“Material Models Available”选项栏中依次单击 Structural→Linear→Elastic→Isotropic, 弹出“Linear Isotropic Properties for Material Number 1”对话框, 在“EX”选项的输入栏中输入“2.1e11”, 在“PRXY”选项的输入栏中输入“0.3”。继续在“Material Models Available”选项栏中单击“Structural→Density”, 在“DENS”选项的输入栏中输入“7800”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

再依次单击: Main Menu→Preprocessor→Material Models, 弹出“Define Material Model Behavior”对话框。在“Material Models Available”选项栏中依次单击 Structural→Linear→Elastic→Isotropic, 弹出“Linear Isotropic Properties for Material Number 2”对话框, 在“EX”选项的输入栏中输入“3.5e10”, 在“PRXY”选项的输入栏中输入“0.1667”, 继续在“Material Models Available”选项栏中单击“Structural→Density”, 在“DENS”选项的输入栏中输入“2500”。单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
MP,EX,1,2.1e11
MP,PRXY,1,0.3
MP,DENS,1,7800
MP,EX,2,3.5e10
MP,PRXY,2,0.1667
MP,DENS,2,2500
```

## 5. 建立几何网格模型

### 1) 创建第一个节点

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Nodes→In Active CS, 弹出“Create Nodes in Active Coordinate System”对话框。在“NODE Node number”选项的输入栏中输入“1”, 在“X,Y,Z Location in active CS”选项的输入栏中分别输入“0”、“-5”、“0”, 单击“Apply”按钮, 节点1将出现在ANSYS图形窗口中。

对应命令流:

```
N,1,0,-5
```

### 2) 复制节点

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Copy→Nodes→Copy, 弹出“Copy nodes”对话框, 如图5-2所示, 拾取节点1, 按照图5-2所示进行设置后, 单击“OK”按钮, 退出节点复制。

对应命令流:

```
NGEN,4,1,1,0,0,12
```

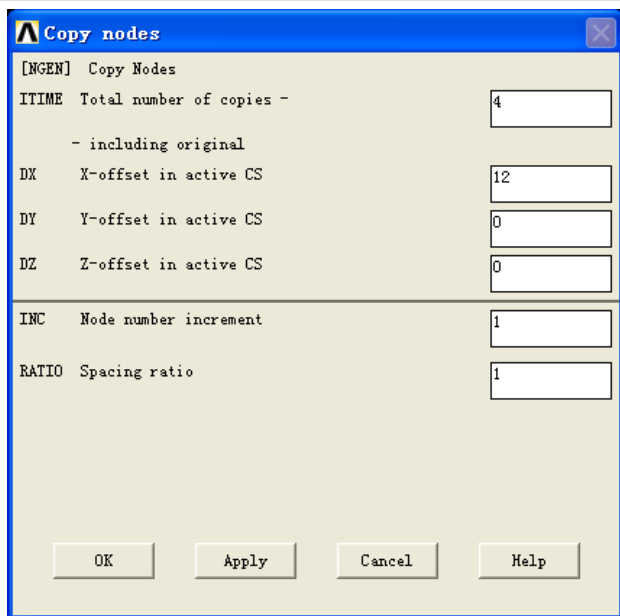


图 5-2 “Copy nodes”对话框

### 3) 创建其他节点

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Nodes→In Active CS, 弹出“Create Nodes in Active Coordinate System”对话框。在“NODE Node number”选项的输入栏中输入“5”, 在“X,Y,Z Location in active CS”选项的输入栏中分别输入“0”、“-5”、“12”, 单击“Apply”按钮, 节点5将出现在ANSYS图形窗口中。

对应命令流:

```
N,5,0,-5,12
```

#### 4) 复制生成其他节点

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Copy→Nodes→Copy, 弹出“Copy nodes”对话框, 拾取节点 5, “在 ITIME Total number of copies-including original”选项的输入栏中输入“3”, 其他选项与节点 1 设置相同, 单击“OK”按钮。

对应命令流:

```
NGEN,3,1,5,5,5,12
```

#### 5) 镜像节点

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Reflect→Nodes, 弹出“Reflect nodes”拾取对话框, 单击“Pick All”按钮。弹出“Reflect nodes”对话框, 在“Ncomp Plane of symmetry”选项的下拉列表中选择“X-Z plane Y”, 在“INC Node number increment”选项的输入栏中输入“7”, 单击“OK”按钮。

对应命令流:

```
NSYM,Y,7,1,7
```

#### 6) 设置杆单元网格划分单元属性

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→Default Attribs, 弹出“Meshing Attributes”对话框, 如图 5-3 所示, 设置好单元属性(默认设置)。

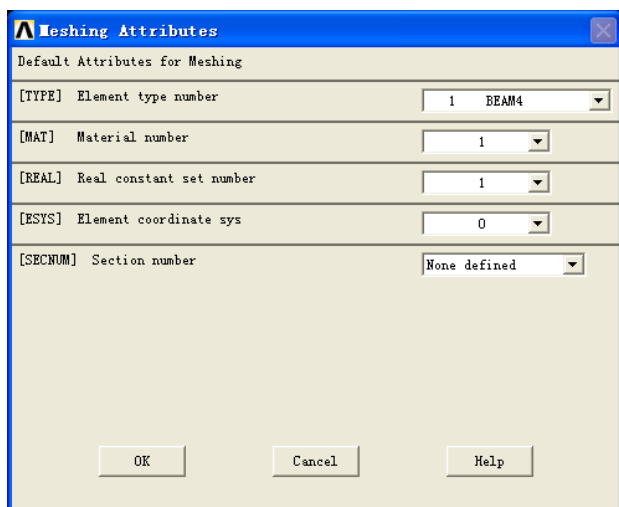


图 5-3 “Meshing Attributes”对话框

对应命令流:

```
TYPE,1
```

```
MAT,1
```

```
REAL,1
```

### 7) 生成杆单元

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Auto Numbered→Thru Nodes, 弹出“Elements from Nodes”拾取对话框, 在图形窗口, 拾取节点 1 和 2 (按照该顺序), 单击“Apply”按钮, 在图形窗口中节点 1 和 2 间将生成一个杆单元 1。然后依次建立其他各个杆件单元及节点编号, 参见表 5-1。

表 5-1 单元及节点编号表

单元号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
节点 I	1	2	3	8	9	10	5	6	12	13	5	6	7
节点 J	2	3	4	9	10	11	6	7	13	14	12	13	14
单元号	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
节点 I	4	11	2	2	9	9	1	2	3	8	9	10	
节点 J	7	14	5	7	12	14	5	6	7	12	13	14	

### 8) 设置壳单元网格划分单元属性

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→Default Attribs, 弹出“Meshing Attributes”对话框, 按照如图 5-4 所示设置好单元属性。

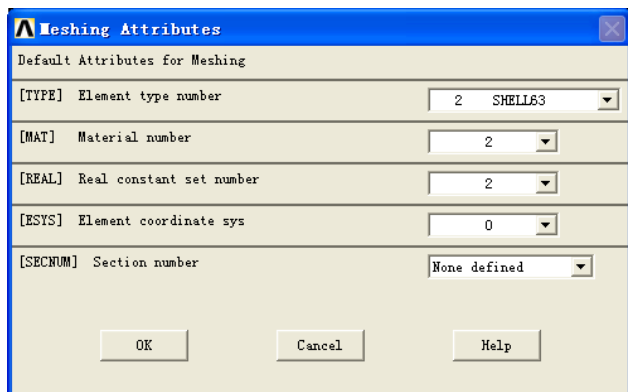


图 5-4 “Meshing Attributes”对话框

对应命令流:

```
TYPE,2  
MAT,2  
REAL,2
```

### 9) 生成壳单元

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Auto Numbered→Thru Nodes, 弹出“Elements from Nodes”拾取对话框, 在图形窗口, 依次拾取节点 1、2、9 和 8 (按照该顺序), 单击“Apply”按钮, 在图形窗口生成一个壳单元 26; 再依次拾取节点 2、3、10 和 9, 单击“Apply”按钮, 生成一个壳单元 27; 最后依次拾取节点 3、4、11 和 10, 单击“OK”按钮, 在图形窗口生成一个壳单元 28。

## 10) 生成另外半幅桥

(1) 镜像半幅桥节点。依次单击：Main Menu→Preprocessor→Modeling→Reflect→Nodes，弹出“Reflect nodes”拾取对话框，单击“Pick All”按钮。弹出“Reflect nodes”对话框，在“Ncomp Plane of symmetry”选项的下拉列表中选择“Y-Z plane X”，在“INC Node number increment”选项的输入栏中输入“14”，单击“OK”按钮。

(2) 镜像半幅桥单元。依次单击：Main Menu→Preprocessor→Modeling→Reflect→Elements→Auto Numbered，弹出“Reflect Elems Auto-Num”拾取对话框，单击“Pick All”按钮。弹出“Reflect Elems Auto-Num”对话框，在“NINC Node no. increment”选项的输入栏中输入“14”，单击“OK”按钮。

## 6. 加载求解

### 1) 定义求解类型

依次单击：Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis，弹出“New Analysis”对话框，在“[ANTYPE] Type of analysis”选项组中选择“Modal”选项，单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流：

```
ANTYPE,2
```

### 2) 定义模态提取方法

依次单击：Main Menu→Solution→Analysis Type→Analysis Options，弹出“Modal Analysis”对话框，如图 5-5 所示。在“[MODOPT] Mode extraction method”选项组中选择“Block Lanczos”选项，在“No. of modes to extract”选项的输入栏中输入“8”，单击“OK”按钮，弹出“Block Lanczos Method”对话框，如图 5-6 所示。在“FREQB Start Freq (initial shift)”选项的输入栏中输入“0”，在“FREQE End Frequency”选项的输入栏中输入“100”，单击“OK”按钮退出。

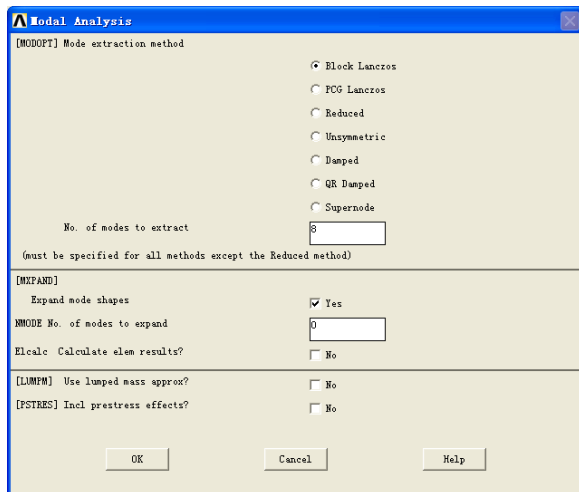


图 5-5 “Modal Analysis”对话框



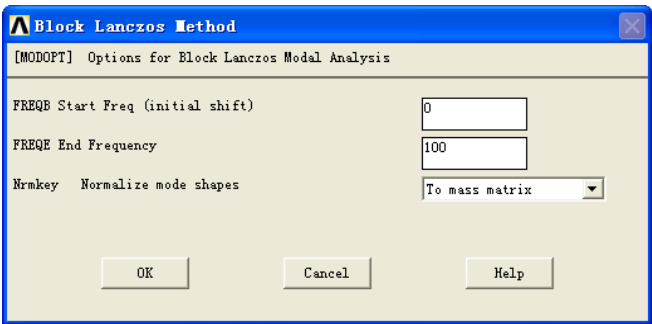


图 5-6 “Block Lanczos Method” 对话框

对应命令流:

```
MODOPT,LANB,8,0,100, ,OFF
```

3) 施加位移全约束

依次单击: Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes, 弹出“Apply U,ROT on Nodes”拾取对话框, 在其输入栏中输入节点编号“18,25,4,11”(也可在图形窗口中用鼠标点取节点), 单击“OK”按钮, 弹出“Apply U,ROT on Nodes”对话框, 在“Lab2 DOFs to be constrained”选项的下拉列表中选择“All DOF”, 在“VALUE Displacement value”选项的输入栏中输入“0”, 单击“OK”按钮, 完成位移约束设置。

对应命令流:

```
D,18, , , , ,UX,UY,UZ,ROTX,ROTX,  
D,25, , , , ,UX,UY,UZ,ROTX,ROTX,  
D,4, , , , ,UY,UZ,ROTX,ROTX,  
D,11, , , , ,UY,UZ,ROTX,ROTX,
```

4) 求解

依次单击: Main Menu→Solution→Solve→Current LS, 弹出“/STATUS Command”文本框及“Solve Current Load Step”对话框, 浏览完文本框后单击其右上角关闭按钮。单击“Solve Current Load Step”对话框上的“OK”按钮, ANSYS 开始求解计算。求解完成后, 弹出“Note”对话框, 单击“Close”按钮, 关闭该对话框。

对应命令流:

```
SOLVE  
FINISH
```

7. 进入一般后处理, 查看结果

1) 查看各阶模态的频率

依次单击: Main Menu→General Postproc→Results Summary, 弹出“SET,LIST Command”对话框, 如图 5-7 所示, 从中可以查看各阶模态频率。

对应命令流:

```
SET,LIST
```

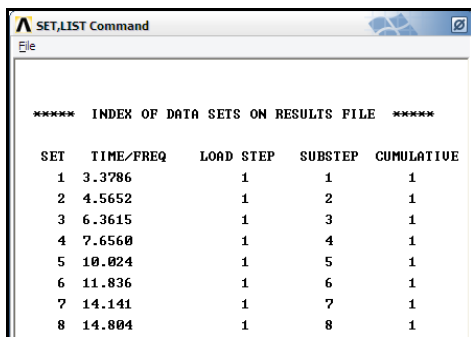


图 5-7 “SET,LIST Command”对话框

## 2) 读取第一阶振型

依次单击: Main Menu→General Postproc→Read Results→First Set。

## 3) 绘制结构一阶振型云图

依次单击: Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu, 弹出“Contour Nodal Solution Data”对话框, 依次单击: Nodal Solution→DOF Solution→DOF Solution→Displacement vector sum, 单击“OK”按钮, 显示结构一阶振型云图。

对应命令流:

```
SET, FIRST
PLNSOL, U, SUM, 2, 1.0
```

## 4) 选择输出其他振型云图

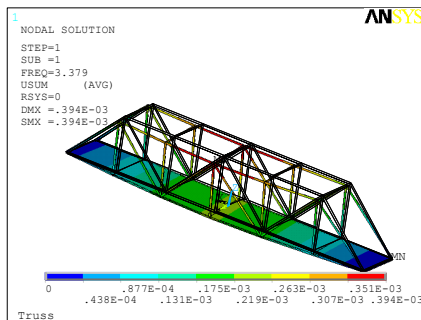
依次单击: Main Menu→General Postproc→Read Results→Next Set, 重复步骤 3), 显示结构二阶振型云图。

对应命令流:

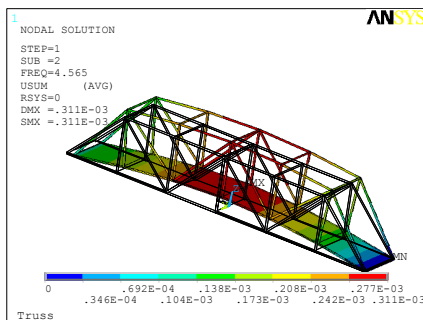
```
SET, NEXT
PLNSOL, U, SUM, 2, 1.0
```

## 5) 绘制其他各阶振型云图

重复步骤 4), 绘制其他各阶振型云图。各阶模态的振型结果示意图如图 5-8 所示。

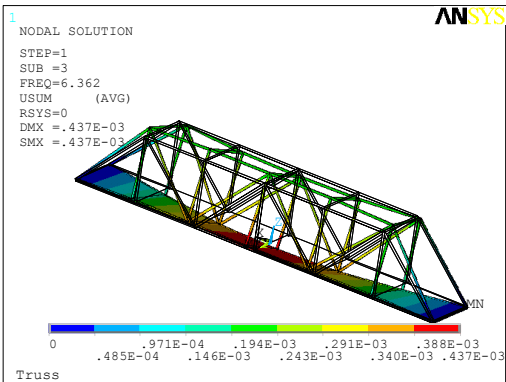


(a) 第一阶

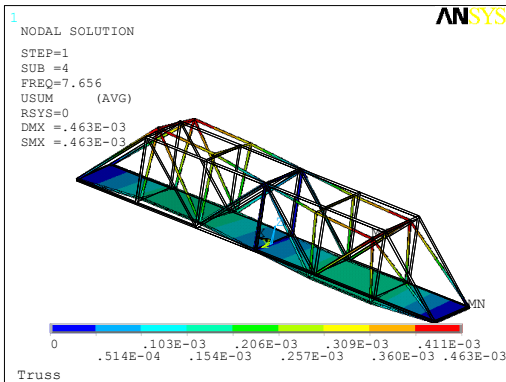


(b) 第二阶

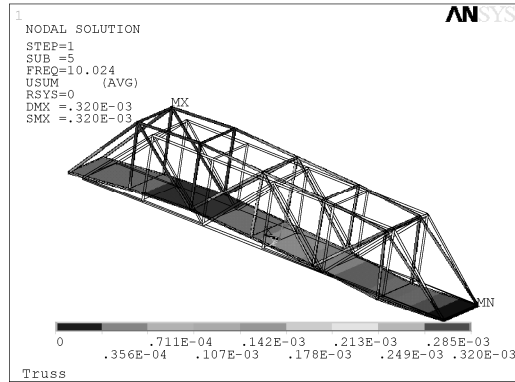
图 5-8 图形显示各阶模态的振型结果示意图



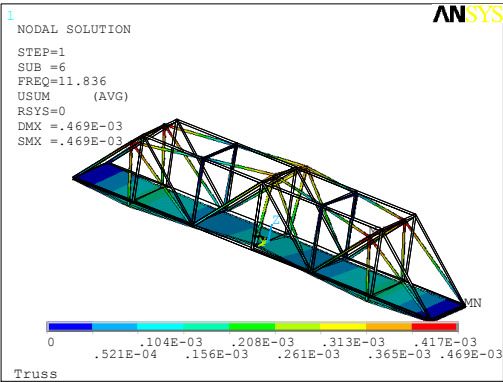
(c) 第三阶



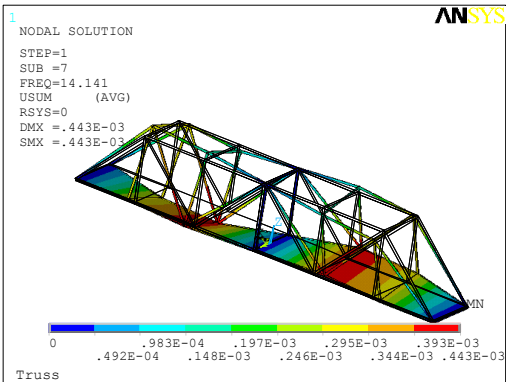
(d) 第四阶



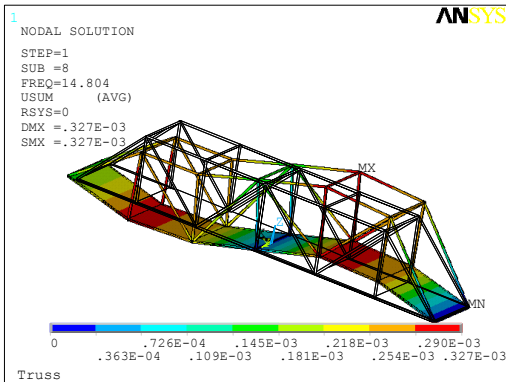
(e) 第五阶



(f) 第六阶



(g) 第七阶



(h) 第八阶

图 5-8 图形显示各阶模式的振型结果示意图 (续)

### 5.2.3 桁架桥模态分析完整命令流

FINISH

!退出以前模块

```

/CLEAR, START                                !清除系统中所有数据，读入启动文件设置
! (1) 建立工作文件名和工作标题
/FILNAME, EX5-1                               !指定当前工程的文件名
/TITLE, Truss                                !定义标题
/UNITS, SI                                    !采用国际单位制
! (2) 定义单元类型及实常数
/PREP7                                         !进入前处理模块
ET,1,4                                         !所有杆件单元
ET,2,63                                        !桥面板单元
R,1,3,2,2,2                                   !杆件实常数
R,2,0.3,0.3,0.3,0.3                           !桥面板实常数
! (3) 定义材料性能参数
!杆系材料属性
MP,EX,1,2.1e11                                !输入材料弹性模量
MP,PRXY,1,0.3                                !输入材料泊松比
MP,DENS,1,7800                                !输入材料密度
!桥面板材料属性
MP,EX,2,3.5e10                                !输入材料弹性模量
MP,PRXY,2,0.1667                             !输入材料泊松比
MP,DENS,2,2500                                !输入材料弹性模量
! (4) 建立几何模型
N,1,0,-5                                       !上弦起点
NGEN,4,1,1,0,0,12
N,5,0,-5,12                                  !下弦起点
NGEN,3,1,5,5,5,12
NSYM,Y,7,1,7                                 !镜像复制
!生成下梁
TYPE,1                                         !选择单元类型
MAT,1,                                         !选择单元材料
REAL,1                                         !选择单元实常数
E,1,2                                         !有节点 1 和 2 生成单元
EGEN,3,1,1,1,0,0,0,0,12                     !EGEN,3,1,1 此为默认状态
E,8,9                                         !由节点 8 和 9 生成单元
EGEN,3,1,4
!生成上梁
E,5,6
EGEN,2,1,7
E,12,13
EGEN,2,1,9
E,5,12
E,6,13
E,7,14
!生成端斜梁
E,4,7

```

```

E,11,14
!生成斜杆
E,2,5
E,2,7
E,9,12
E,9,14
!生成竖杆
E,1,5
E,2,6
E,3,7
E,8,12
E,9,13
E,10,14
!生成桥面板
TYPE,2                !选择单元类型
MAT,2                 !选择单元材料
REAL,2               !选择单元实常数
E,1,2,9,8
E,2,3,10,9
E,3,4,11,10
!生成另外半幅桥
NSYM,x,14,1,14
ESYM,,14,1,28
!生成下横梁（补充生成）
TYPE,1                !选择单元类型
MAT,1                 !选择单元材料
REAL,1               !选择单元实常数
E,1,8
E,2,9
E,3,10
E,4,11
E,16,23
E,17,24
E,18,25
NUMMRG,NODE           !压缩节点编号
NUMMRG,ELEMENT        !压缩单元编号
FINISH
!（5）加载求解
/SOLU
ANTYPE,2              !选择分析类型，模态分析
MODEOPT,LANB,8,0,100, ,OFF !选择分块兰索斯法，提取八阶模态
!施加边界条件
D,18, , , , ,UX,UY,UZ,ROTX,ROTZ, !节点 17 加全约束
D,25, , , , ,UX,UY,UZ,ROTX,ROTZ, !节点 22 加全约束

```

```

D,4,,,,,UY,UZ,ROTX,ROTZ,      !节点 4 加全约束
D,11,,,,,UY,UZ,ROTX,ROTZ,     !节点 11 加全约束
SOLVE                          !求解
FINISH
! (6) 进入一般后处理, 查看结果
/POST1                          !进入一般后处理
SET,LIST                       !列表各阶模态
SET,FIRST                      !读取第一阶模态
PLNSOL,U,SUM,2,1.0            !显示振型云图
SET,NEXT                      !读取下一阶模态
PLNSOL,U,SUM,2,1.0            !显示振型云图
SET,NEXT                      !读取下一阶模态
PLNSOL,U,SUM,2,1.0            !显示振型云图
SET,NEXT                      !读取下一阶模态
PLNSOL,U,SUM,2,1.0            !显示振型云图
SET,NEXT                      !读取下一阶模态
PLNSOL,U,SUM,2,1.0            !显示振型云图
SET,NEXT                      !读取下一阶模态
PLNSOL,U,SUM,2,1.0            !显示振型云图
SET,NEXT                      !读取下一阶模态
PLNSOL,U,SUM,2,1.0            !显示振型云图
SET,NEXT                      !读取下一阶模态
PLNSOL,U,SUM,2,1.0            !显示振型云图
SET,NEXT                      !读取下一阶模态
PLNSOL,U,SUM,2,1.0            !显示振型云图

```

## 5.2.4 实例分析二：锚固式储液罐的模态分析

### 1. 问题描述

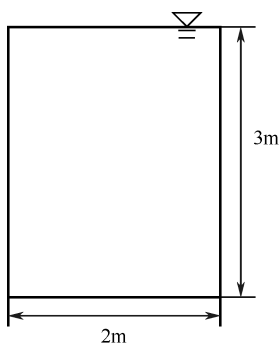


图 5-9 某锚固式储液罐  
几何尺寸示意图

某锚固式储液罐模型，如图 5-9 所示，容器壁厚为 0.01m，其中流体密度  $\rho_f=1000\text{kg/m}^3$ ，重力加速度  $g=9.8\text{m/s}^2$ ，声速  $C_0=400\text{m/s}$ ，容器弹性模量  $E=2\text{e}11\text{N/m}^2$ ，密度  $\rho_s=7800\text{kg/m}^3$ ，泊松比  $\nu=0.3$ 。求解当储液罐内液体高度为 2.8m 时的模态参数。

### 2. 建立工作文件名和工作标题

#### 1) 定义工作文件名

依次单击：Utility Menu→File→Change Jobname，弹出“Change Jobname”对话框，在“[FILNAM] Enter new jobname”选项的输入栏中输入工作文件名“EX5-2”，勾选“New log and error files”选项的复选框，设置为“Yes”，然后单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流：

```
/FILENAME, EX5-2
```

## 2) 定义工作标题

依次单击: Utility Menu→File→Change Title, 弹出“Change Title”对话框, 在“[/TITLE] Enter new title”选项的输入栏中输入“Modal Analysis of Large Storage Tanks”, 然后单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
/TITLE, Modal Analysis of Large Storage Tanks
```

## 3) 定义单位制

在命令栏输入窗口中输入“/UNITS, SI”, 采用国际单位制。

对应命令流:

```
/UNITS, SI
```

# 3. 定义单元类型及实常数

## 1) 定义单元类型

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add→Edit/Delete, 弹出“Element Types”拾取对话框。单击“Add...”按钮, 弹出“Library of Element Types”对话框, 在“Library of Element Types”选项的左列表框中选择“Structural→Shell”选项, 右列表框中选择“4node 181”选项, 在“Element type reference number”选项的输入栏中输入“1”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。在“Element Types”拾取对话框中单击“Add...”按钮, 弹出“Library of Element Types”对话框, 在“Library of Element Types”选项的左列表框中选择“ANYSY Fluid”选项, 右列表框中选择“3D acoustic 30”选项, 在“Element type reference number”选项的输入栏中输入“2”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。在“Element Types”拾取对话框中单击“Add...”按钮, 弹出“Library of Element Types”对话框, 在“Library of Element Types”选项的左列表框中选择“ANYSY Fluid”选项, 右列表框中选择“3D acoustic 30”选项, 在“Element type reference number”选项的输入栏中输入“3”(默认), 单击“OK”按钮关闭该对话框。在“Element Types”拾取对话框中单击“Options...”按钮, 在弹出的“FLUID30 element type options”对话框中选择“Structural absent”选项, 单击“OK”按钮关闭该对话框, 单击“Element Types”拾取对话框中的“Close”按钮关闭该拾取对话框。

对应命令流:

```
ET, 1, SHELL181  
ET, 2, FLUID30  
ET, 3, FLUID30, , 1
```

## 2) 定义实常数

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Real Constants→Add→Edit/Delete, 弹出“Real Constants”拾取对话框, 单击“Add...”按钮, 弹出“Element Type for Real Constants”对话框, 单击“OK”按钮, 弹出“Real Constant Set Number 1, for shell181”对话框, 在4个节点的厚度选项中都输入“0.01”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。在“Real Constants”拾取对话框中单击“Add...”按钮, 弹出“Element Type for Real Constants”对话框, 单击“OK”

按钮,弹出“Real Constant Set Number 1,for Fluid30”对话框,在“Reference Pressure”选项的输入栏中输入“0”,单击“OK”按钮关闭该对话框。在“Real Constants”拾取对话框中单击“Close”按钮关闭该拾取对话框,退出实常数设置。

对应命令流:

```
R, 1, 0.01
R, 2, 0
```

#### 4. 定义材料性能参数

##### 1) 定义材料

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Material Models,弹出“Define Material Model Behavior”对话框。在“Material Models Available”选项栏中依次单击: Structural→Linear→Elastic→Isotropic,弹出“Linear Isotropic Properties for Material Number 1”对话框,在“EX”选项的输入栏中输入“2e11”,在“PRXY”选项的输入栏中输入“0.3”,单击“OK”按钮关闭该对话框。在“Material Models Available”选项栏中依次单击: Structural→Density,在弹出的对话框中输入混凝土密度“7800”,单击“OK”按钮关闭该对话框。在“Material Models Available”选项栏中依次单击: Acoustic→Density,在弹出的对话框中输入流体密度“1000”,单击“OK”按钮关闭该对话框。在“Material Models Available”选项栏中依次单击 Acoustic→Sonic Velocity,在弹出的对话框中输入流体声速为“400”,单击“OK”按钮关闭该对话框。

##### 2) 退出材料设置

在“Define Material Model Behavior”对话框中,依次单击: Material→Exit(或者直接单击右上角关闭按钮),关闭该对话框,退出材料属性设置。

对应命令流:

```
MP, EX, 1, 2e11
MP, NUXY, 1, 0.3
MP, DENS, 1, 7800
MP, DENS, 2, 1000
MP, SONC, 2, 400
```

#### 5. 建立几何模型

依照前面学过的方法,依次建立关键点、轮廓线,然后生成储液罐的五个面,以及表示液体区域的体,方法与静力学部分使用的方法基本一致,如有问题可以参考给出的命令流,其几何模型示意图如图 5-10 所示。

对应命令流:

K, 1, 0, 0, 0	!生成 1 号节点
K, 2, 2, 0, 0	!生成 2 号节点
K, 3, 2, 2, 0	!生成 3 号节点
K, 4, 0, 2, 0	!生成 4 号节点
A, 1, 2, 3, 4	!由 4 个节点生成面



```
VEXT, ALL, , , , 2.8  
ASEL, S, LOC, Z, 2.8  
VEXT, ALL, , , , 0.2  
ALLSEL, ALL  
VDELE, 2  
ASEL, S, LOC, Z, 3  
ADELE, ALL  
ALLSEL, ALL  
ASEL, ALL
```

!由面生成体

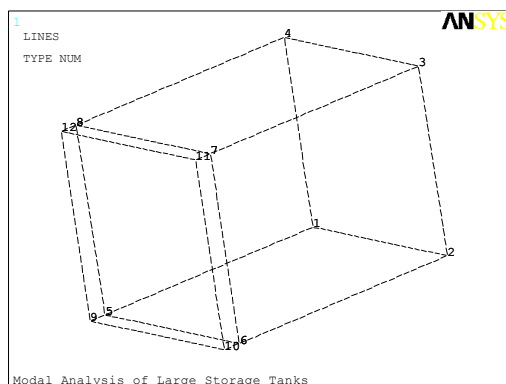


图 5-10 锚固式储液罐的几何模型示意图

## 6. 划分网格并生成单元

依照前面学过的方法，设置全局网格尺寸为 0.1，划分网格，然后给定单元属性，在本次计算中，总共有 3 种单元，固体壳单元为 **Shell181**，与固体相接处的流体单元为 **Fluid30**，以及不接触固体的流体单元为 **Fluid30**，如有问题可以参考给出的命令流，其单元模型示意图如图 5-11 所示。

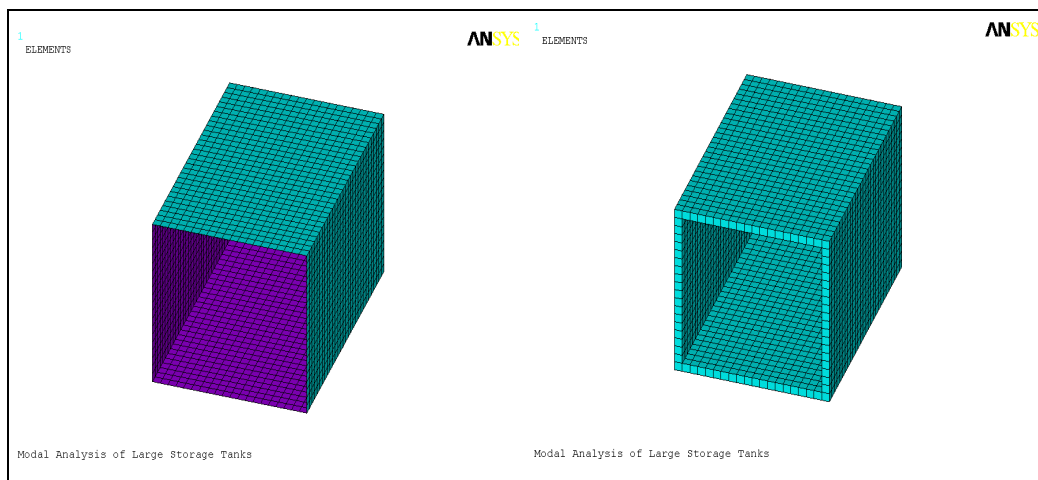


图 5-11 图形显示锚固式储液罐的单元模型示意图

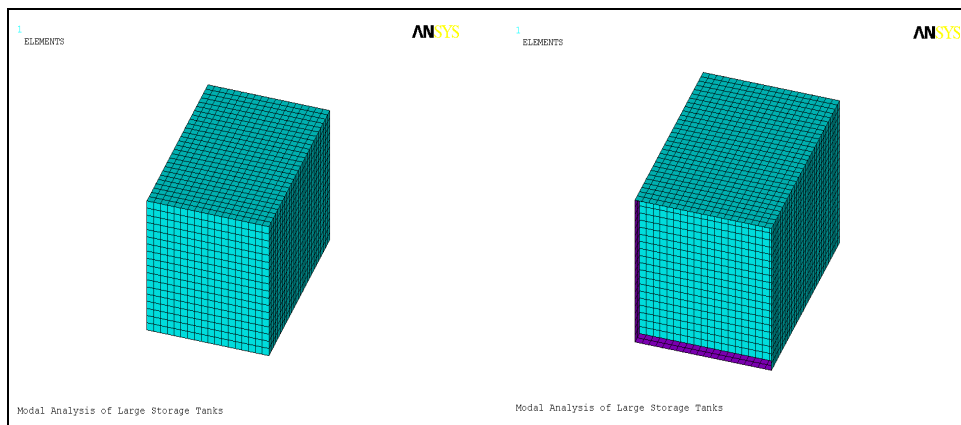


图 5-11 图形显示锚固式储液罐的单元模型示意图（续）

对应命令流:

ASEL, U, LOC, Z, 2.8	!选择 Z 坐标为 2.8 的面
AATT, 1, 1, 1	!给面赋单元类型为 1
ESIZE, 0.1	!全局单元尺寸为 0.1
AMESH, ALL	!划分网格
ALLSEL, ALL	
VATT, 2, 2, 3	!给面赋单元类型为 3
ESIZE, 0.1	
VMESH, ALL	
ALLSEL, ALL	
ASLV, S	!选择体上所有的面
ASEL, U, LOC, Z, 2.8	!选择 Z 坐标为 2.8 的面
NSLA, S, 1	!选择面上的节点
ESLN, S	!选择节点上的单元
ESEL, R, TYPE, , 3	!选择单元类型为 3 的单元
EMODIF, ALL, TYPE, 2	!修改其单元类型为 2
ALLSEL, ALL	

## 7. 加载求解

### 1) 定义求解类型

依次单击: Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis, 弹出“New Analysis”对话框, 在“[ANTYPE] Type of analysis”选项组中选择“Model”选项, 单击“OK”按钮关闭该对话框。单击“Analysis Options”按钮, 在弹出“Modal Analysis”选项的复选框中选择“unsympathetic”选项, 并将求解模态阶数和扩张模态阶数都设置为“30”。

对应命令流:

```
ANTYPE, MODAL
MODEOPT, UNSYM, 30
MXPAND, 30, , 0
```

## 2) 标记流固耦合交界面并耦合

依次单击: Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Field Surface Intr→On Elementss, 弹出“Apply FSIN on Elems”拾取对话框, 选择与储液罐接触的流体单元, 单击“OK”按钮, 弹出“Apply FSIN on Elements”对话框, 将流固耦合标记为“1”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
ASLV, S
ASEL, U, LOC, Z, 2.8
NSLA, S, 1
ESLN, S
ESEL, R, MAT, , 2
SF, ALL, FSI, 1
```

## 3) 施加位移全约束

依次单击: Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Ares, 弹出“Apply U,ROT on Areas”拾取对话框, 选择储液罐的底面, 单击“OK”按钮, 弹出“Apply U,ROT on Areas”对话框, 选择默认全约束条件, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
ASEL, S, LOC, Z, 0
DA, ALL, ALL, 0
```

## 4) 施加分布载荷

依次单击: Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Pressure→On Ares, 弹出“Apply PRES on Areas”拾取对话框, 选择储液罐液面的表面, 单击“OK”按钮, 在弹出的“Apply PRES on Areas”对话框中, 参考压力设置为“0”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
ASEL, S, LOC, Z, 2.8
DA, ALL, PRES, 0
```

## 5) 求解

依次单击: Main Menu→Solution→Solve→Current LS, 弹出“/STATUS Command”文本框及“Solve Current Load Step”窗口, 浏览完毕文本框后单击右上角关闭按钮。单击“Solve Current Load Step”窗口上的“OK”按钮, ANSYS 开始求解计算, 求解完成后, 弹出“Note”对话框。

对应命令流:

```
SOLVE
FINISH
```

# 8. 进入一般后处理, 查看结果

## 1) 查看固有频率

依次单击: Main Menu→General Postproc→Results Summary, 弹出“SET,LIST Command”

对话框，如图 5-12 所示。

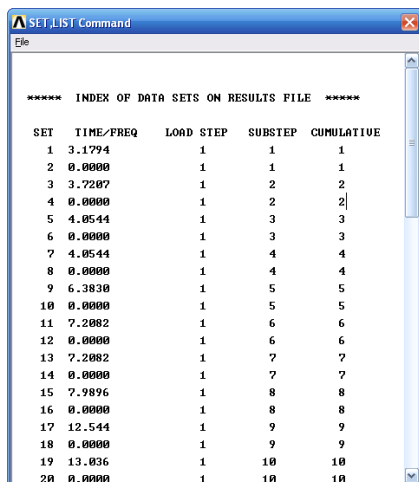


图 5-12 “SET,LIST Command”对话框

对应命令流:

SET, LIST

2) 读取第一阶振型

依次单击: Main Menu→General Postproc→Read Results→First Set。

3) 绘制第一阶振型云图

依次单击: Main Menu→General Postproc→Plot Results→Deformed Shape, 弹出“Plot Deformed Shape”对话框, 选择“Def Shape only”, 单击“OK”按钮。显示锚固式储液罐第一阶振型结果示意图, 如图 5-13 所示。

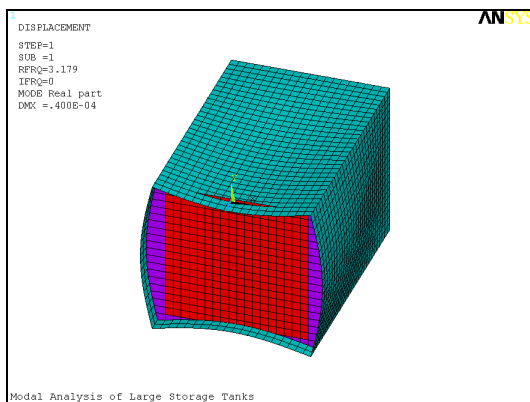


图 5-13 图形显示锚固式储液罐第一阶振型结果示意图

对应命令流:

SET, FIRST  
PLDISP, 0

### 5.2.5 锚固式储液罐的模态分析完整命令流

```

FINISH                                !退出以前模块
/CLEAR, START                         !清除系统中数据，读入启动文件设置
! (1) 建立工作文件名和工作标题
/FILNAME, EX5-2                      !指定当前工程的文件名
/TITLE, Modal Analysis of Large Storage Tanks !定义标题
/UNITS, SI                           !采用国际单位制
/PREP7                                !进入前处理模块
! (2) 定义单元类型及实常数
ET, 1, SHELL181                      !定义 1 号单元类型为壳单元 SHELL181
ET, 2, FLUID30                       !定义 2 号单元类型为流体单元 FLUID30
ET, 3, FLUID30, , 1                 !定义 3 号单元类型为不接触固体单元的流体单元
R, 1, 0.01                          !定义 1 号单元实常数，厚度为 0.01m
R, 2, 0                             !定义 2 号单元实常数，参考压力为 0Pa
! (3) 定义材料性能参数
MP, EX, 1, 2e11                     !定义第一种材料弹性模量
MP, NUXY, 1, 0.3                    !定义第一种材料泊松比
MP, DENS, 1, 7800                   !定义第一种材料密度
MP, DENS, 2, 1000                   !定义第二种材料密度
MP, SONC, 2, 400                    !定义第二种材料声速（流体弹性模型）
! (4) 建立几何模型
K, 1, 0, 0, 0                      !生成节点 1
K, 2, 2, 0, 0                      !生成节点 2
K, 3, 2, 2, 0                      !生成节点 3
K, 4, 0, 2, 0                      !生成节点 4
A, 1, 2, 3, 4                      !由 4 个节点生成面
VEXT, ALL, , , , 2.8              !由面生成体
ASEL, S, LOC, Z, 2.8
VEXT, ALL, , , , 0.2
ALLSEL, ALL
VDELE, 2
ASEL, S, LOC, Z, 3
ADELE, ALL
ALLSEL, ALL
ASEL, ALL
! (5) 划分网格并生成单元
ASEL, U, LOC, Z, 2.8              !选择 Z 坐标为 2.8 的面
AATT, 1, 1, 1                      !给面赋单元类型为 1
ESIZE, 0.1                         !全局单元尺寸为 0.1
AMESH, ALL                         !划分网格
ALLSEL, ALL
VATT, 2, 2, 3                     !给面赋单元类型为 3

```

```

ESIZE, 0.1
VMESH, ALL
ALLSEL, ALL
ASLV, S                                !选择体上所有的面
ASEL, U, LOC, Z, 2.8                  !选择 Z 坐标为 2.8 的面
NSLA, S, 1                            !选择面上的节点
ESLN, S                               !选择节点上的单元
ESEL, R, TYPE, , 3                   !选择单元类型为 3 的单元
EMODIF, ALL, TYPE, 2                 !修改其单元类型为 2
ALLSEL, ALL
FINISH                                !退出前处理模块
! (6) 加载求解
/SOLU                                !进入求解模块
ANTYPE, MODAL                        !定义结构分析类型为模态分析
MODOPT, UNSYM, 30                    !定义求解方法为 UNSYM, 求解前 30 阶模态
MXPAND, 30, , 0                      !定义扩展模态为 30 阶
ASLV, S                              !从体中选择所有的面
ASEL, U, LOC, Z, 2.8                 !再从中选择 Z 坐标为 2.8 的面
NSLA, S, 1                           !选择面上的节点
ESLN, S                              !选择节点上的单元
ESEL, R, MAT, , 2                    !修改其材料类型为第二种
SF, ALL, FSI, 1                      !耦合流体和固体边界
ASEL, S, LOC, Z, 0                   !选择 Z 坐标为 0 的面
DA, ALL, ALL, 0                      !约束其所有自由度
ASEL, S, LOC, Z, 2.8                 !选择 Z 坐标为 2.8 的面
DA, ALL, PRES, 0                     !约束其压力为 0Pa
ALLSEL, ALL                          !求解
SOLVE
FINISH                                !退出计算模块
! (7) 进入一般后处理, 查看结果
/POST1                               !进入一般后处理
SET, LIST                            !列表各阶模态
SET, FIRST                           !读取第一阶模态
PLNSOL, U, SUM, 2, 1.0               !显示振型云图

```

## 5.3 谐响应分析

任何持续的周期载荷都可以转化为简谐变化的载荷, 而把这类载荷引起的结构持续的周期响应定义为谐响应。谐响应分析可以用来确定线性结构在承受随时间按简谐规律变化载荷时的稳态响应, 可以预测结构的持续动力特性, 克服共振、疲劳等有害效果, 但瞬态振动问题不能采用谐响应方法分析。谐响应分析虽然是一种线性分析, 但在 ANSYS 中可以包含非对称系统矩阵, 如分析流体-结构相互作用问题。

本节将介绍单自由度弹簧质量系统谐响应分析的简单应用。

### 5.3.1 概述

谐响应分析可采用 3 种计算方法：完全法 (Full)、缩减法 (Reduced) 和模态叠加法 (Mode Superposition)。

#### 1. 完全法

完全法是 3 种方法中最易使用的方法。它采用完整的系统矩阵计算谐响应，不涉及质量矩阵的近似，而且允许有非对称矩阵，一次计算得到所有的位移和应力；完全法允许定义各种类型的载荷，如节点力、外加的（非零）位移、单元载荷（压力和温度），并且可以将载荷定义在实体模型上。但预应力选项不可用；由于计算量比较大，复杂模型不推荐使用。

#### 2. 缩减法

缩减法通过采用主自由度和缩减矩阵来压缩问题的规模。主自由度处的位移被计算出来后，可以被扩展到初始的完整 DOF 集上。不过，初始解只计算出主自由度处的位移，要得到完整的位移、应力和力的解则需执行模态扩展，而且所有载荷必须施加在用户定义的主自由度上。

#### 3. 模态叠加法

模态叠加法通过对模态分析得到的振型乘上因子并求和来计算结构的响应。因为模态叠加法允许使用模态分析结果，载荷通过 LVSCALE 命令用于谐响应分析中，响应曲线图比缩减法更平滑、更精确，并且可以包含预应力和振型阻尼，对于许多复杂工程问题，模态叠加法效率较高，更常用。但这种方法也存在不能施加非零位移、初始条件中不能有预加的载荷的缺陷。

### 5.3.2 实例分析：弹簧质量系统谐响应分析

#### 1. 问题描述

如图 5-14 所示，两个质量块和两个弹簧组成的弹簧质量系统中， $k_1=k_2=100\text{kN/m}$ ， $m_1=m_2=1\text{kg}$ ， $m_1$  质量块上作用沿  $x$  方向的简谐激振力  $F\sin\omega t=100\sin\omega t$ ，试求该弹簧质量系统中的两质量块的位移响应。

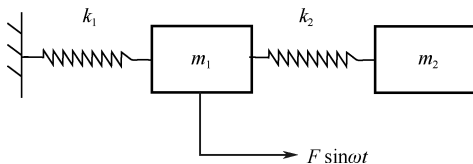


图 5-14 弹簧质量系统示意图

## 2. 建立工作文件名和工作标题

### 1) 定义工作文件名

依次单击: Utility Menu→File→Change Jobname, 弹出“Change Jobname”对话框, 在“[/FILNAM] Enter new jobname”选项的输入栏中输入工作文件名为“EX5-3”, 勾选“New log and error files”选项的复选框, 设置为“Yes”, 然后单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
/FILNAME, EX5-3
```

### 2) 定义工作标题

依次单击: Utility Menu→File→Change Title, 弹出“Change Title”对话框, 在“[/TITLE] Enter new title”选项的输入栏中输入“Harmonic Analysis of Mass-Spring System”, 然后单击“OK”按钮。

对应命令流:

```
/TITLE, Harmonic Analysis of Mass-Spring System
```

### 3) 定义单位制

在命令栏输入窗口中输入“/UNITS, SI”, 采用国际单位制。

对应命令流:

```
/UNITS, SI
```

## 3. 定义单元类型及实常数

### 1) 定义单元类型

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add→Edit/Delete, 弹出“Element Types”拾取对话框。单击“Add...”按钮, 弹出“Library of Element Types”对话框, 在“Library of Element Types”选项的左列表框中选择“Combination”选项, 右列表框中选择“Spring-damper14”选项, 在“Element type reference number”选项的输入栏中输入“1”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。在“Element Types”拾取对话框中单击“Add...”按钮, 再次弹出“Library of Element Types”对话框, 在“Library of Element Types”选项的左列表框中选择“Structural→Mass”选项, 右列表框中选择“3D mass21”选项, 在“Element type reference number”选项的输入栏中输入“1”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
ET, 1, COMBIN14, , , 2  
ET, 2, MASS21, , , 4
```

### 2) 定义实常数

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Real Constants→Add→Edit/Delete, 弹出“Real Constants”拾取对话框, 单击“Add...”按钮, 弹出“Element Type for Real Constants”对话框, 单击“OK”按钮, 弹出“Real Constant Set Number 1, for COMBIN14”对话框, 在“Springconstant”选项的输入栏中输入“100”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。在“Real



Constants”拾取对话框中单击“Add...”按钮，弹出“Element Type for Real Constants”对话框，单击“OK”按钮，弹出“Real Constant Set Number 1,for MASS21”对话框，参考压力选项中输入“1”，单击“OK”按钮关闭该对话框。在“Real Constants”拾取对话框中单击“Close”按钮关闭该拾取对话框，退出实常数设置。

对应命令流：

```
R, 1, 100  
R, 2, 1
```

#### 4. 建立几何模型

创建三个节点。依次单击：Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Nodes→In Active CS，弹出“Create Nodes in Active Coordinate System”对话框。在“NODE Node number”选项的输入栏中输入“1”，在“X,Y,Z Location in active CS”选项的输入栏中分别输入“0”、“0”、“0”，单击“Apply”按钮，节点1将出现在ANSYS图形窗口中。然后依次生成其他两个节点。

对应命令流：

```
N, 1  
N, 3, 1  
FILL
```

#### 5. 划分网格并生成单元

创建四个单元。依次单击：Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Auto Numbered→Thru Nodes，弹出“Elements from Nodes”拾取对话框，在图形窗口中拾取节点1和节点2（按照该顺序），单击“Apply”按钮，在图形窗口中节点1和节点2之间将生成一个弹簧单元。重复上述操作过程将生成另外一个弹簧单元和两个质量单元。

对应命令流：

```
E, 1, 2  
E, 2, 3  
TYPE, 2  
REAL, 2  
E, 2  
E, 3
```

#### 6. 加载求解

1) 定义求解类型：依次单击：Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis，弹出“New Analysis”对话框，在“[ANTYPE] Type of analysis”选项组中选择“Harmonic”选项，单击“OK”按钮关闭该对话框。单击“Analysis Options”按钮，弹出“Harmonic Analysis”对话框，选择“Full”求解方法，选择“Amplitud+phase”振幅和频率的结果显示方式，其他保持默认设置。

对应命令流:

```
ANTYPE, HARMIC  
HROPT, FULL  
HROUT, OFF  
OUTPR, BASIC, 1
```

## 2) 设置载荷子步

依次单击: Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time→Frequenc→Freq and Substps, 弹出“Harmonic Frequency and Substep Options”对话框, 在“[HARFRQ] Hrmonic freq range”选项的两个输入栏中分别输入“0”和“4”, 即设定频率范围为 0~4Hz, 在“[NSUBST] Number of substeps”选项的输入栏中输入“400”, 即设定时间步长为“0.01Hz”, 在“[KBC] Stepped or ramped b.c”选项组中选择“Ramped”选项, 即设定载荷步为渐变类型, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
NSUBST, 400  
HARFRQ, , 4  
KBC, 1
```

## 3) 施加位移约束

依次单击: Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On nodes, 弹出“Apply F/M on Nodes”拾取对话框, 选择节点 1, 单击“OK”按钮, 弹出“Apply F/M on Nodes”对话框, 选择“UX”和“UY”选项, 单击“OK”按钮关闭该对话框。重复操作, 约束节点 2 和节点 3 的 UY 自由度。

对应命令流:

```
D, 1, UY, , , 4  
D, 1, UX, , , 1
```

## 4) 施加集中载荷

依次单击: Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Force→Moment→On nodes, 弹出“Apply F/M on Nodes”拾取对话框, 选择节点 2, 单击“OK”按钮, 弹出的“Apply F→M on Nodes”对话框, 在“Lab Direction of force→mom”选项组中选择“Fx”选项, 在“VALUE Real part of force→mom”选项的输入栏中输入“100”, 在“VALUE Image part of force→mom”选项的输入栏中输入“0”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
F, 2, FX, 100
```

## 5) 求解


依次单击: Main Menu→Solution→Solve→Current LS, 弹出“/STATUS Command”文本框及“Solve Current Load Step”对话框, 浏览完毕文本框后单击右上角关闭按钮。单击“Solve Current Load Step”对话框上的“OK”按钮, ANSYS 开始求解计算, 求解完成后, 弹出“Note”对话框。

对应命令流:

SOLVE  
FINISH

7. 进入一般后处理，查看结果

1) 查看固有频率

依次单击: Main Menu→TimeHist Postpro→Variable Viewer, 弹出“Time History Variables”拾取对话框, 单击 “+” 按钮, 添加节点位移。弹出 “Add Time-History Variable” 对话框, 在 “Item to be contoured” 选项中依次单击: “Nodal Solution→DOF Solution→X-Componet of displacement”, 单击 “OK” 按钮, 关闭该对话框, 然后会弹出 “Node for Data” 拾取对话框, 选择节点 2, 单击 “OK” 按钮, 至此添加了节点 2 的  $x$  位移。重复操作, 添加节点 3 的  $x$  位移。单击工具栏中按钮, 可以得到弹簧质量系统的谐响应分析结果, 如图 5-15 所示。

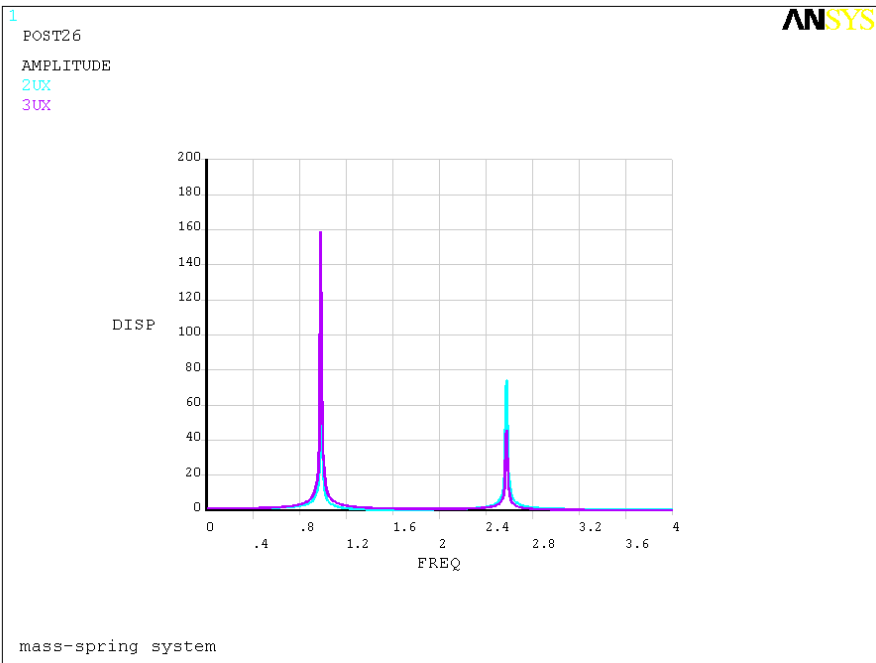


图 5-15 图形显示弹簧质量系统的谐响应分析结果

对应命令流:

/POST26	
NSOL, 2, 2, U, X, 2UX	!记录节点 2 $x$ 方向位移
NSOL, 3, 3, U, X, 3UX	!记录节点 3 $x$ 方向位移
/GRID, 1	!打开网格
/AXLAB, Y, DISP	!指定 $Y$ 轴的范围
PLVAR, 2, 3	

### 5.3.3 弹簧质量系统谐响应分析完整命令流

```

FINISH                                !退出以前模块
/CLEAR, START                          !清除系统中所有数据，读入启动文件设置
! (1) 建立工作文件名和工作标题
/FILNAME, EX5-3                       !指定当前工程的文件名
/TITLE, Harmonic Analysis of Mass-Spring System !定义标题
/UNITS, SI                             !采用国际单位制
/PREP7                                 !进入前处理模块
! (2) 定义单元类型及实常数
ET, 1, COMBIN14, , , 2                 !第一种单元类型为弹簧单元 COMBIN14
ET, 2, MASS21, , , 4                  !第二种单元类型为质量单元 MASS21, , , 4
R, 1, 100                              !第一种单元实常数，弹簧的刚度系数
R, 2, 1                                !第二种单元实常数，质量
! (3) 建立几何模型
N, 1                                   !生成节点 1，默认坐标为 0
N, 3, 1                                !生成节点 2
FILL                                   !自动生成二号节点
! (4) 划分网格并生成单元
E, 1, 2                                !弹簧单元
E, 2, 3
TYPE, 2
REAL, 2
E, 2                                    !质量单元
E, 3
FINISH
! (5) 加载求解
/SOLU
ANTYPE, HARMIC                         !定义分析类型为谐响应分析
HROPT, FULL                            !定义求解方法为 full
HROUT, OFF                             !以振幅和相位角的方式显示结果
OUTPR, BASIC, 1
NSUBST, 400                            !频率范围内分为 400 个子步
HARFRQ, , 4                            !频率范围为 0~4Hz
KBC, 1                                 !定义时间步长为渐进变化
D, 1, UY, , , 4                        !约束所有 Y 向位移
D, 1, UX, , , 1                        !约束节点 1X 向位移
F, 2, FX, 100                          !节点 2 施加 X 方向上的激振力为 100N
SOLVE
FINISH
! (6) 进入一般后处理，查看结果
/POST26
NSOL, 2, 2, U, X, 2UX                  !记录节点 2 x 方向位移

```

NSOL, 3, 3, U, X, 3UX

!记录节点 3  $X$  方向位移

/GRID, 1

!打开网格

/AXLAB, Y, DISP

!指定  $Y$  轴的范围

PLVAR, 2, 3

!显示节点 2 和节点 3 的幅频曲线

FINISH

## 5.4 瞬态动力学分析

瞬态动力学分析用于确定承受任意随时间变化载荷时结构响应的一种方法,分析稳态载荷、瞬态载荷和简谐载荷的随意组合作用下结构位移、应变、应力和力响应等。由于载荷随时间剧烈变化,使得作用在结构上的惯性力和阻尼力对于分析结构的强度、刚度和稳定性非常重要,这一点是动力学分析区别于静力学分析最重要的因素之一。

### 5.4.1 概述

瞬态动力学分析的计算方法与谐响应分析一样,即完全法(Full)、缩减法(Reduced)和模态叠加法(Mode Superposition)3种方法。不过瞬态动力学分析的载荷更为复杂,一般都是时间的函数,ANSYS 中有线性渐变方式 Ramped 法和突变方式 Stepped 法两种载荷变化方式:一般依据载荷变化方式将整个时间历程划分成多个载荷步(LoadStep),每个载荷步代表载荷发生一次突变或者渐变阶段,在每个载荷步内还可以划分多个子步(SubStep),经过多个子步的求解实现一个载荷步的求解,通过多个载荷步的求解实现整个时间历程响应计算。ANSYS 瞬态动力学分析中允许在实体模型和有限元模型上施加载荷,而且基本包括所有载荷类型,如约束、集中力、力矩、面载荷、体载荷等。

### 5.4.2 实例分析:预应力 T 梁瞬态分析

#### 1. 问题描述

长度为 10m 的预应力 T 梁,尺寸如图 5-16 所示,材料为 C45 混凝土,弹性模量为 33.5GPa,泊松比为 0.3,密度为 2551kg/m<sup>3</sup>,预应力钢筋为高强度钢丝束,弹性模量为 200GPa,线膨胀系数为 0.000 05,预应力为 15 000MPa,钢筋截面积为 6126mm<sup>2</sup>,在跨中施加 30t 的冲击载荷,时间为 1s,试求跨中挠度的瞬态响应。

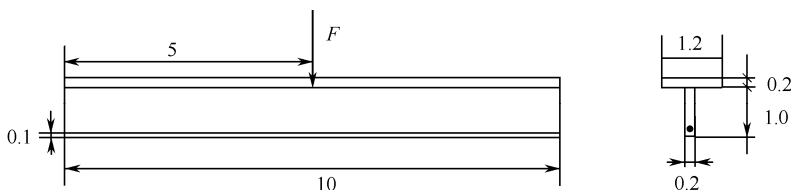


图 5-16 预应力 T 梁尺寸示意图

## 2. 建立工作文件名和工作标题

### 1) 定义工作文件名

依次单击: Utility Menu→File→Change Jobname, 弹出“Change Jobname”对话框, 在“[/FILNAM] Enter new jobname”选项的输入栏中输入工作文件名为“EX5-4”, 勾选“New log and error files”选项的复选框, 设置为“Yes”, 然后单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
/FILNAME, EX5-4
```

### 2) 定义工作标题

依次单击: Utility Menu→File→Change Title, 弹出“Change Title”对话框, 在“[/TITLE] Enter new title”选项的输入栏中输入“Transient Analysis of Pre-stress T\_beam”, 然后单击“OK”按钮。

对应命令流:

```
/TITLE, Transient Analysis of Pre-stress T_beam
```

### 3) 定义单位制

在输入窗口中输入“/UNITS, SI”, 采用国际单位制。

对应命令流:

```
/UNITS, SI
```

### 4) 设定允许计算文件大于 4GB

由于本实例模型较为复杂, 临时计算文件要大于 4GB, 因而需要这一特殊设定, 没有对应的 GUI 操作路径, 但可以通过依次单击: Utility Menu→List→Status→Configuration, 查看是否设定成功。

对应命令流:

```
/CONFIG,FSPLIT,750
```

## 3. 定义单元类型及实常数

### 1) 定义单元类型

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add→Edit/Delete, 弹出“Element Types”拾取对话框。单击“Add...”按钮, 弹出“Library of Element Types”对话框, 在“Library of Element Types”选项的左列表框中选择“Structural→Solid”选项, 右列表框中选择“Brick 8node 45”选项, 在“Element type reference number”选项的输入栏中输入“1”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。在“Element Types”拾取对话框中单击“Add...”按钮, 弹出“Library of Element Types”对话框, 在“Library of Element Types”选项的左列表框中选择“Structural→Link”选项, 右列表框中选择“spar 8”选项, 在“Element type reference number”选项的输入栏中输入“2”(默认), 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
ET, 1, SOLID45  
ET, 2, LINK8
```

## 2) 定义实常数:

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Real Constants→Add→Edit/Delete, 弹出“Real Constants”选项对话框, 单击“Add...”按钮, 弹出“Element Type for Real Constants”对话框, 单击“OK”按钮, 弹出“Real Constant Set Number 1, for LINK8”对话框, 在选项中输入“0.006 126”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。在“Real Constants”选项对话框中单击“Close”按钮关闭该选项对话框, 退出实常数设置。

对应命令流:

```
R,1,0.006126
```

## 4. 定义材料性能参数

### 1) 定义材料

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Material Models, 弹出“Define Material Model Behavior”对话框。在“Material Models Available”选项下依次单击: Structural→Linear→Elastic→Isotropic, 弹出“Linear Isotropic Properties for Material Number 1”对话框, 在“EX”选项的输入栏中输入“3.35e10”, 在“PRXY”选项的输入栏中输入“0.2”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。在“Material Models Available”选项下依次单击: Structural→Density, 弹出“Density for Material Number 1”对话框, 输入混凝土密度为“2551”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。在“Material Models Available”选项下依次单击: Damping→Constant, 弹出“Damping for Material Number 1”对话框, 输入材料阻尼为“0.01”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。在菜单栏中依次单击: Material→New Model, 弹出“Define Material ID”对话框, 输入材料编号为“2”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。在“Material Models Available”选项下依次单击: Structural→Linear→Elastic→Isotropic, 弹出“Linear Isotropic Properties for Material Number 1”对话框, 在“EX”选项的输入栏中输入“2e11”, 在“PRXY”选项的输入栏中输入“0.3”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。在“Material Models Available”选项下依次单击: Structural→Thermal Expansion→Secant Coefficient→Isotropic, 弹出“Thermal Expansion Secant Coefficient for Material Number 2”对话框, 在“ALPX”选项的输入栏中输入钢筋线膨胀系数为“2e-5”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

### 2) 退出材料设置

在“Define Material Model Behavior”对话框中, 依次单击: Material→Exit (或者直接单击右上角关闭按钮), 关闭该对话框, 退出材料属性设置。

对应命令流:

```
MP,EX,1,3.35e10
MP,NUXY,1,0.2
MP,DENS,1,2551
MP,DAMP,1,0.01
MP,EX,2,2e11
MP,NUXY,2,0.3
MP,ALPX,2,2e-5
```

## 5. 建立几何模型

依照前面学过的方法，依次建立关键点、轮廓线，然后生成 T 梁，以及表示钢筋束的线，方法与前面讲过的方法基本一致，如有问题可以参考给出的命令流。

对应命令流：

```
K,1,-0.1,0,0      !生成节点 1
K,2,0.1,0,0       !生成节点 2
K,3,0.1,1,0       !生成节点 3
K,4,0.6,1,0       !生成节点 4
K,5,0.6,1.2,0     !生成节点 5
K,6,0.1,1.2,0     !生成节点 6
K,7,-0.1,1.2,0    !生成节点 7
K,8,-0.6,1.2,0    !生成节点 8
K,9,-0.6,1,0      !生成节点 9
K,10,-0.1,1,0     !生成节点 10
KGEN,2,1,10,1,,,10
V,1,2,3,10,11,12,13,20    !由 8 个节点生成体
V,3,6,7,10,13,16,17,20
V,3,4,5,6,13,14,15,16
V,7,8,9,10,17,18,19,20
K,21,0,0,1,0      !生成节点 21
K,22,0,0,1,0      !生成节点 22
L,21,22            !由两个节点生成线
```

## 6. 划分网格并生成单元

依照前面学过的方法，设置全局网格尺寸为 0.05，划分网格，然后给定单元属性，在本次计算中，总共有 2 种单元，即模拟混凝土的实体单元 SOLID45 和模拟钢筋束的杆单元 LINK8。最后设置耦合杆单元和实体单元的自由度，依次单击：Main Menu→Preprocessor→Coupling→Ceqn→Adjacent Regions，弹出“Constraint Equations Connecting Adjacent Regions”对话框，如图 5-17 所示。在“TOLER Tolerance about elements”选项的输入栏中输入单元整体容差为“0.1”，在“Toler. to move a node to surface”选项的输入栏中输入节点与面的容差为“0.01”。生成的 T 梁单元模型如图 5-18 所示。

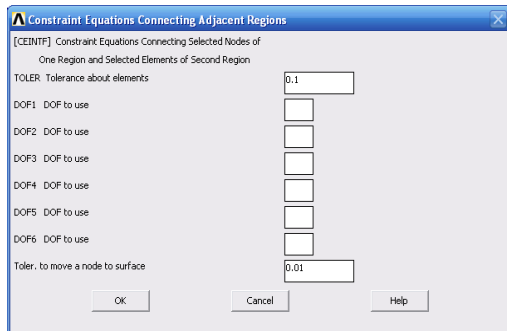


图 5-17 “Constraint Equations Connecting Adjacent Regions”对话框



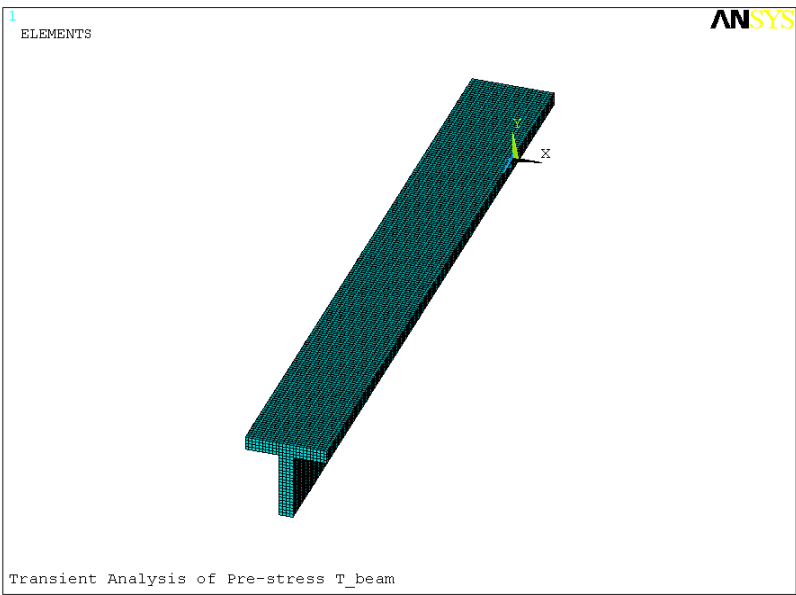


图 5-18 图形显示 T 梁单元模型示意图

对应命令流:

TYPE,1	!第一种单元类型
MAT,1	!第一种材料
ESIZE,0.05	!全局单元尺寸为 0.05
VMESH,ALL	!划分网格
TYPE,2	!第二种单元类型
MAT,2	!第二种材料
REAL,1	!第二种单元赋实常数
LSEL,S,LOC,X,0	!选择 X 坐标为 0 的线
LSEL,R,LOC,Y,0.1	!从中再选择 Y 坐标为 0.1 的线
LESIZE,ALL,0.05	!线单元尺寸为 0.05
LMESH,ALL	!划分线单元网格
ALLSEL,ALL	
CEINTF,0.1,,,,,,,,,0.01	!耦合自由度
EPLT	!图形显示单元
FINISH	!退出前处理模块

7. 加载求解

1) 定义求解类型

依次单击：Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis，弹出“New Analysis”对话框，在“[ANTYPE] Type of analysis”选项组中选择“Transent”选项，单击“OK”按钮关闭该对话框。单击“Analysis Options”按钮，弹出“Transient Analysis”对话框，选择“Full”求解方法，单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
ANTYPE,TRANS
TRNOPT,FULL
```

## 2) 施加位移约束

依次单击: Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes, 弹出“Apply U,ROT on Nodes”拾取对话框, 选择预应力钢筋, 单击“OK”按钮, 弹出“Apply U,ROT on Nodes”对话框, 在“Lab2 DOFs to be constrained”选项组中选择“ALL DOF”选项, 约束其三个方向上的线位移, 单击“OK”按钮关闭该对话框。重复操作, 约束 T 梁两个端面上的下部节点的“UX”选项和“UY”选项, 其结果示意图如图 5-19 所示。

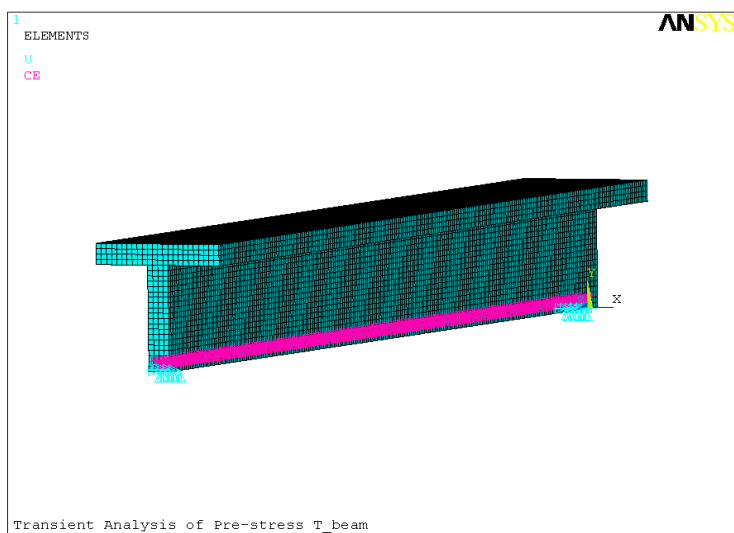


图 5-19 图形显示 T 梁单元模型施加位移约束结果的示意图

对应命令流:

```
NSEL,S,LOC,Y,0
NSEL,R,LOC,Z,0.25
D,ALL,UX,0
D,ALL,UY,0
D,ALL,UZ,0
NSEL,S,LOC,Y,0
NSEL,R,LOC,Z,9.75
D,ALL,UX,0
D,ALL,UY,0
ALLSEL,ALL
```

## 3) 施加冲击载荷和预应力

依次单击: Main Menu→Solution→Analysis Type→Sol'n Control, 弹出“Solution Controls”对话框, 在“Analysis Options”选项组中选择“Small Displacement Transient”和“Calculate

prestress effects”选项，在“Time at end of loadstep”选项的输入栏中输入“2”，在“Number of substeps”选项的输入栏中输入“100”，在“Write Items to Results File”选项组中选择“All solution items”和“Frequency→Write every substep”选项，单击“OK”按钮关闭该对话框。

依次单击：Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time→Frequenc→Time-Time Step，弹出“Time-Time Step”对话框，在“TIME”选项组中选择“1”，“DELTIM”选项组中选择“0.01”，“KBC”选项组中选择“Ramped”，单击“OK”按钮关闭对话框。

**注意：**如果在“Main Menu→Solution→Load Step Opts”菜单下没有找到“Time→Frequenc”选项，需要打开隐藏菜单“Main Menu→Solution→Unabridged Menu”。

依次单击：Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Force→Moment→On nodes，弹出“Apply F/M on Nodes”拾取对话框，选择T梁上表面的几何中心点，单击“OK”按钮后弹出“Apply F/M on Nodes”对话框，在“Lab”选项的下拉列表中选择“FY”，在“VALUE”选项的输入栏中输入“-300 000”，然后单击“OK”按钮关闭对话框。

用温度变化引起的应变模拟预应力在预应力钢筋束上施加温度，依次单击：Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Temperature→On Lines，弹出“Apply TEMP on Lines”拾取对话框，选择几何模型中的钢筋束，单击“OK”按钮后弹出“Apple TEMP on Lines”对话框，在“VAL1 Temperature”选项的输入栏中输入“-375”，单击“OK”按钮关闭对话框。

至此，设定好了一个载荷步内的载荷和预应力，重复施加载荷和温度设定，完成下一个载荷步的设置。不同之处在于载荷在这个时间被释放，模拟冲击作用，所以载荷设置为“0”，其结果显示如图5-20所示。

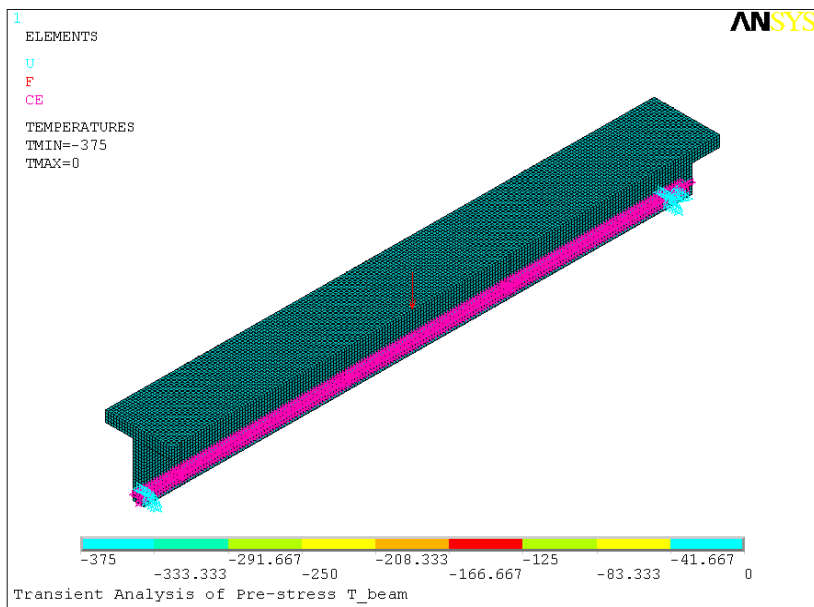


图 5-20 图形显示载荷结果示意图

对应命令流：

TIME,1

```
TIMINT,ON
KBC,1
DELTIM,0.01,,,OFF
NSUBST,100
LSEL,S,TYPE,,2
BFL,ALL,TEMP,-375
NSEL,S,LOC,X,0
NSEL,R,LOC,Y,1.2
NSEL,R,LOC,Z,5
F,ALL,FY,-300000
ALLSEL,ALL
OUTRES,ALL,ALL
LSWRITE,1
TIME,2
TIMINT,ON
KBC,1
DELTIM,0.01,,,OFF
NSUBST,100
LSEL,S,TYPE,,2
BFL,ALL,TEMP,-375
NSEL,S,LOC,X,0
NSEL,R,LOC,Y,1.2
NSEL,R,LOC,Z,5
F,ALL,FY,0
ALLSEL,ALL
OUTRES,ALL,ALL
LSWRITE,2
LSSOLVE,1,2,1
```

#### 4) 求解

依次单击: Main Menu→Solution→Solve→Current LS, 弹出“/STATUS Command”文本框及“Solve Current Load Step”对话框, 浏览完毕文本框后单击其右上角关闭按钮。单击“Solve Current Load Step”对话框中的“OK”按钮, ANSYS 开始求解计算, 求解完成后, 弹出“Note”对话框。


本模型较为复杂, 需要较长的计算时间。

对应命令流:

```
SOLVE
FINISH
```

## 8. 进入一般后处理, 查看结果

查看位移响应。依次单击: Main Menu→TimeHist Postpro→Variable Viewer, 弹出“Time History Variables”对话框, 单击“+”按钮, 添加节点位移。弹出“Add Time-History Variable”

对话框，选择“Nodal Solution→DOF Solution→Y-Componet of displacement”选项，单击“OK”按钮关闭对话框，然后会弹出“Node for Data”拾取对话框，任意选择一个节点，单击“OK”按钮，至此添加了该节点的 Y 位移，单击工具栏中按钮模拟示波器，可以得到预应力 T 梁瞬态分析结果，如图 5-21 所示。

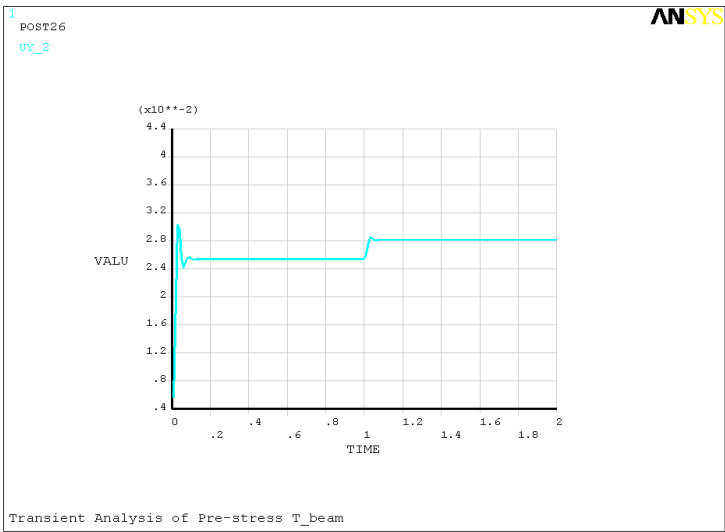


图 5-21 图形显示预应力 T 梁瞬态分析结果

### 5.4.3 预应力 T 梁瞬态分析完整命令流

FINISH	!退出以前模块
/CLEAR,START	!清除系统中数据,读入启动文件设置
! (1) 建立工作文件名和工作标题	
/FILENAME,EX5-4	!指定当前工程的文件名
/TITLE, Transient Analysis of Pre-stress T_beam	!定义标题
/UNITS, SI	!采用国际单位制
/CONFIG,FSPLIT,750	!允许计算临时文件大于 4GB
/PREP7	!进入前处理模块
! (2) 定义单元类型及实常数	
ET,1,SOLID45	!定义 1 号单元类型为实体单元 SOLID45
ET,2,LINK8	!定义 2 号单元类型为杆单元 LINK8
R,1,0.006126	!定义杆单元实常数, 截面积为 0.006 126 m <sup>2</sup>
! (3) 定义材料性能参数	
MP,EX,1,3.35e10	!定义 1 号材料弹性模量
MP,NUXY,1,0.2	!定义 1 号材料密度
MP,DAMP,1,0.01	!定义 1 号材料阻尼
MP,EX,2,2e11	!定义 2 号材料弹性模量
MP,NUXY,2,0.3	!定义 2 号材料泊松比
MP,ALPX,2,2e-5	!定义 2 号材料线膨胀系数

! (4) 建立几何模型

K,1,-0.1,0,0

!生成节点 1

K,2,0.1,0,0

!生成节点 2

K,3,0.1,1,0

!生成节点 3

K,4,0.6,1,0

!生成节点 4

K,5,0.6,1.2,0

!生成节点 5

K,6,0.1,1.2,0

!生成节点 6

K,7,-0.1,1.2,0

!生成节点 7

K,8,-0.6,1.2,0

!生成节点 8

K,9,-0.6,1,0

!生成节点 9

K,10,-0.1,1,0

!生成节点 10

KGEN,2,1,10,1,,10

V,1,2,3,10,11,12,13,20

!由 8 个节点生成体

V,3,6,7,10,13,16,17,20

V,3,4,5,6,13,14,15,16

V,7,8,9,10,17,18,19,20

K,21,0,0.1,0

!生成节点 21

K,22,0,0.1,10

!生成节点 22

L,21,22

!由两节点生成线

! (5) 加载求解

/SOLU

!进入求解模块

ANTYPE,TRANS

!定义结构分析类型为瞬态分析

TRNOPT,FULL

!定义求解方法为 full

NSEL,S,LOC,Y,0

!选择 Y 坐标为 0 的节点

NSEL,R,LOC,Z,0.25

!从中再选择 Z 坐标为 0.25 的节点

D,ALL,UX,0

!约束 X 位移为 0

D,ALL,UY,0

!约束 Y 位移为 0

D,ALL,UZ,0

!约束 Z 位移为 0

NSEL,S,LOC,Y,0

!选择 Y 坐标为 0 的节点

NSEL,R,LOC,Z,9.75

!从中再选择 Z 坐标为 9.75 的节点

D,ALL,UX,0

!约束 X 位移为 0

D,ALL,UY,0

!约束 Y 位移为 0

ALLSEL,ALL

TIME,1

!定义第一个载荷步

TIMINT,ON

!打开时间列表

KBC,1

!设定载荷为线性渐变方式

DELTIM,0.01,,OFF

!设定载荷子步最大步长

NSUBST,100

!设定划分为 100 个载荷子步

LSEL,S,TYPE,,2

BFL,ALL,TEMP,-375

!施加温度载荷, 模拟预应力

NSEL,S,LOC,X,0

NSEL,R,LOC,Y,1.2

NSEL,R,LOC,Z,5

F,ALL,FY,-300000

!定义跨中载荷为 Y 负方向 300 000N

```
ALLSEL,ALL
OUTRES,ALL,ALL           !设定输出每个载荷子步信息
LSWRITE,1                 !设定该载荷步标签为 1
TIME,2                    !定义第二个时间步
TIMINT,ON
KBC,1
DELTIM,0.01,,,OFF
NSUBST,100
LSEL,S,TYPE,,2
BFL,ALL,TEMP,-375
NSEL,S,LOC,X,0
NSEL,R,LOC,Y,1.2
NSEL,R,LOC,Z,5
F,ALL,FY,0                !释放载荷
ALLSEL,ALL
OUTRES,ALL,ALL
LSWRITE,2
LSSOLVE,1,2,1
SOLVE                     !发出求解命令
FINISH                    !退出求解模块
```

## 5.5 谱分析

谱分析是将模态分析结果和已知谱联系起来的计算结构响应的一种分析方法，主要用于确定结构对随机载荷或随时间变化载荷的动力响应。谱分析的主要应用包括核电站（建筑和部件）、机载电子设备（飞机/导弹）、宇宙飞船部件、飞机构件、任何承受地震或其他不规则载荷的结构或构件，如建筑框架和桥梁等。

### 5.5.1 概述

谱分析主要用于确定结构对随机载荷和随时间变化载荷（如地震、风载等）的动力响应情况，可以代替时间-历程分析。对于谱来说，一般定义为将含有复杂组成的事物分解成为单纯的成分，然后按照这些成分特征量的大小进行排列。

谱分析可分为时间-历程分析和频域的谱分析。时间-历程分析主要应用于瞬态动力学分析。谱分析可以代替费时的时间-历程分析，主要用于确定结构对随机载荷或时间变化载荷（如地震、风载、海洋波浪、喷气发动机推力、火箭发动机振动等）的动力响应情况。

谱分析的意义就在于：依靠这种物理方法，可以用来探索物质世界的信息。

所谓谱，就是谱值与频率的关系图。它表达了时间-历程载荷强度和频率。一个响应谱，代表单自由度系统对时间历程的响应，其中响应可以是位移、速度、加速度和力，等等。

ANSYS 中的谱分析主要有以下 3 种形式。

## 1. 响应谱

一个响应谱代表单自由度系统对时间-历程载荷函数响应，其中响应谱有单点响应谱和多点响应谱两种形式。

(1) 单点响应谱 (Single-Point Response Spectrum, SPRS): 在模型一个点集上定义一条或一族响应谱曲线。

(2) 多点响应谱 (Multi-Point Response Spectrum, MPRS): 模型的多个点上定义不同的响应谱曲线。

## 2. 动力设计分析方法

动力设计分析方法 (Dynamic Design Analysis Method, DDAM) 是美国海军实验室的一份实验报告 (NRL—1396) 中一种特定类型的频谱分析系统，用于分析船用装备的抗振性。

## 3. 功率谱密度

功率谱密度 (Power Spectral Density, PSD) 是结构对随机动力载荷响应的概率统计，功率谱密度是功率谱密度-频率的关系曲线，是用于随机振动的一种概率分析方法。与响应谱分析类似，功率谱密度也可以分为单点功率谱密度和多点功率谱密度两种。

(1) 单点功率谱密度: 在模型的一个点集上指定一个功率谱密度谱。

(2) 多点功率谱密度: 在模型的多个点上指定不同的功率谱密度谱。

# 5.5.2 实例分析：独塔两跨斜拉桥谱分析

## 1. 问题描述

独塔两跨斜拉桥，如图 5-22 所示，跨径 345m，塔高 123.4m，其桥塔截面示意图如图 5-23 所示。

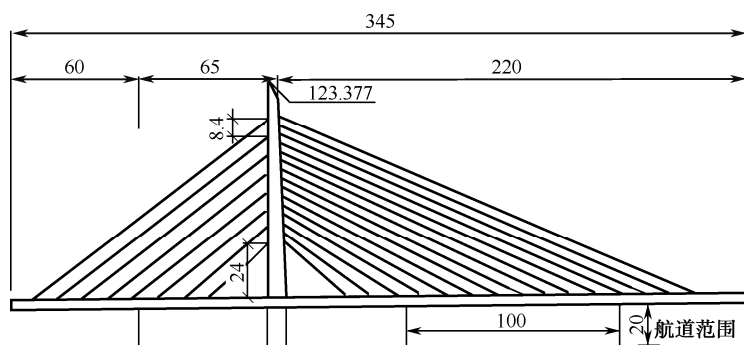


图 5-22 独塔两跨斜拉桥示意图



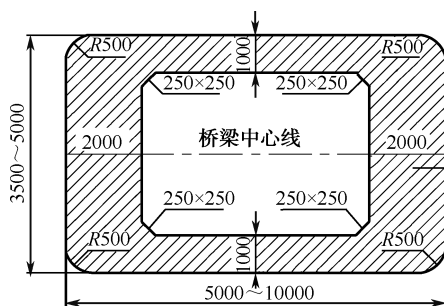


图 5-23 独塔两跨斜拉桥桥塔截面示意图

## 2. 建立工作文件名和工作标题

### 1) 定义工作文件名

依次单击: Utility Menu→File→Change Jobname, 弹出“Change Jobname”对话框, 在“[FILNAM] Enter new jobname”选项的输入栏中输入工作文件名为“EX5-5”, 勾选“New log and error files”选项的复选框, 设置为“Yes”, 然后单击“OK”按钮关闭该对话框。

### 2) 定义工作标题

依次单击: Utility Menu→File→Change Title, 弹出“Change Title”对话框, 在“[/TITLE] Enter new title”选项的输入栏中输入“Cable Stayed Bridge”, 然后单击“OK”按钮。

### 3) 定义单位制

在命令栏输入窗口中输入“/UNITS, SI”, 选取采用国际单位制。

对应命令流:

```
/FILENAME, EX5-5
/TITLE, Cable Stayed Bridge
/UNITS, SI
```

## 3. 定义单元类型及实常数

### 1) 定义单元类型

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add→Edit/Delete, 弹出“Element Types”拾取对话框, 单击“Add...”按钮, 弹出“Library of Element Types”对话框, 在“Library of Element Types”选项的左列表框中选择“Structural→Beam”, 右列表框中选择“2D elastic 4”; 在“Element type reference number”选项的输入栏中输入“1”(默认), 单击“OK”按钮关闭该拾取对话框。单击“Element Types”对话框中的“Close”按钮。

继续依次单击: Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add→Edit/Delete, 弹出“Element Types”拾取对话框。单击“Add...”按钮, 弹出“Library of Element Types”对话框, 在“Library of Element Types”选项的左列表框中选择“Structural/link 8”, 右列表框中选择“Spar 8”; 在“Element type reference number”选项的输入栏中输入“2”(默认), 单击“OK”按钮关闭该拾取对话框。单击“Element Types”对话框中的“Close”按钮。

对应命令流:

ET, 1, BEAM4

ET, 2, LINK8

## 2) 定义实常数

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Real Constants→Add→Edit/Delete, 弹出“Real Constants”拾取对话框, 单击“Add...”按钮, 弹出“Element Type for Real Constants”对话框, 在“Library of Element type”选项组中选择“Type 1 BEAM4”, 单击“OK”按钮, 弹出“Real Constant Set Number 3, for beam4”对话框, 如图 5-24 所示。在“Real Constant Set.No”选项的输入栏中输入“3”, 在“AREA”选项的输入栏中输入“1”, 在“IZZ”选项的输入栏中输入“2”, 在“IYY”选项的输入栏中输入“150”, 在“TKZ”选项的输入栏中输入“1”, 在“TKY”选项的输入栏中输入“0.6”, 在“IXX”选项的输入栏中输入“9”, 其余选项默认为“0”, 单击“Apply”按钮。用同样的方法生成其他梁单元实常数, 各实常数设置参见表 5-2。

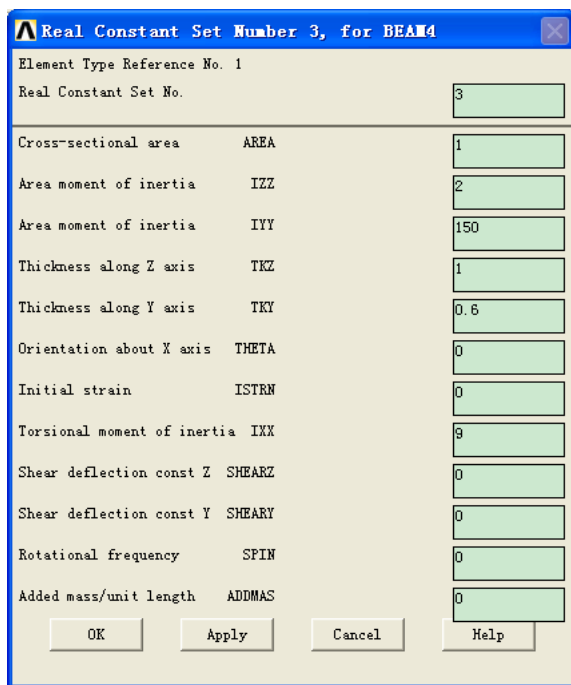


图 5-24 “Real Constant Set Number 3,for BEAM4”对话框

表 5-2 梁单元实常数一览表

Real Constant Set.No	AREA	IZZ	IYY	TKZ	TKY	IXX	其他栏
3	1	2	150	1	0.6	9	0
5	45	29	3000	1	0.6	73	0
7	1	2.5	150	1	0.6	9	0
11	75	1500	950	1	0.6	1900	0
12	18	40	108	1	0.6	100	0

3) 定义杆单元实常数

依次单击：Main Menu→Preprocessor→Real Constants→Add→Edit/Delete，弹出“Real Constants”拾取对话框，单击“Add...”按钮，弹出“Element Type for Real Constants”对话框，在“Library of Element types”选项组中选择“Type 2 LINK8”选项，单击“OK”按钮，弹出“Real Constant Set Number 2, for LINK8”对话框，在“Real Constant Set.No”选项的输入栏中输入“8”，在“AREA”选项的输入栏中输入“0.02”，在“ISTRN”选项的输入栏中输入“0.0025”，单击“OK”按钮关闭该对话框。单击“Real Constants”拾取对话框中的“Close”按钮，退出实常数设置。

对应命令流：

R,3,1,2,150,1,0.6	!3 号梁单元实常数
RMORE,,9	
R,5,45,29,3000,1,0.6	!5 号梁单元实常数
RMORE,,73	
R,7,1,2.5,150,1,0.6	!7 号梁单元实常数
RMORE,,9	
R,11,75,1500,950,1,0.6	!11 号梁单元实常数
RMORE,,1900	
R,12,18,40,108,1,0.6	!12 号梁单元实常数
RMORE,,100	
R,8,0.02,0.0025	!8 号杆单元实常数

4. 定义材料性能参数

1) 定义材料

依次单击：Main Menu→Preprocessor→Material Models，弹出“Define Material Model Behavior”对话框。在该对话框菜单栏中依次单击：“Material→New Model”，弹出“Define Material ID”对话框，在“Define Material ID”选项的输入栏中输入“3”，单击“OK”按钮关闭该对话框，在“Material Models Available”选项中依次单击：Structural→Linear→Elastic→Isotropic，弹出“Linear Isotropic Properties for Material Number 1”对话框，在“EX”选项的输入栏中输入“2.1e11”，在“PRXY”选项的输入栏中输入“0.3”，继续依次单击：Structural→Density，在“DENS”选项的输入栏中输入“7800”。单击“OK”按钮关闭该对话框。

定义其他材料，重复上述步骤，用同样的方法生成其他材料，依次输入的材料参数参见表 5-3。

表 5-3 材料参数

材料编号 Define Material ID	弹性模量 EX	泊松比 PRXY	密度 Density
3	3.45e10	0.167	2650
4	3.55e10	0.2	2780
5	2.1e11	0.3	11000
6	1.9e11	0.3	8650
7	1e16	0.3	—

**注意：**刚臂只是用来模拟刚度的，所以没有给密度。

对应命令流：

```
MP,EX,3,3.45e10      !输入引桥混凝土梁，桥墩的弹性模量
MP,PRXY,3,0.167      !输入引桥混凝土梁，桥墩的泊松比
MP,DENS,3,2650        !输入引桥混凝土梁，桥墩的密度
MP,EX,4,3.55e10      !输入主塔的弹性模量
MP,PRXY,4,0.2        !输入主塔的泊松比
MP,DENS,4,2780        !输入主塔的密度
MP,EX,5,2.1e11       !输入钢箱梁的弹性模量
MP,PRXY,5,0.3        !输入钢箱梁的泊松比
MP,DENS,5,11000       !输入钢箱梁的密度
MP,EX,6,1.9e11       !输入钢索的弹性模量
MP,PRXY,6,0.3        !输入钢索的泊松比
MP,DENS,6,8650       !输入钢索的密度
MP,EX,7,2.1e16       !输入钢箱梁刚臂的弹性模量
MP,PRXY,7,0.3        !输入钢箱梁刚臂的泊松比
MP,DENS,7,
```

## 5. 创建主塔节点

依次单击：Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Nodes→In Active CS，弹出“Create Nodes in Active Coordinate System”对话框。在“NODE Node number”选项的输入栏中输入“370”，在“X,Y,Z Location in active CS”选项的输入栏中分别输入“480”，“11.904”，“0”，单击“Apply”按钮，节点 370 将出现在 ANSYS 图形窗口中。用同样的方法生成其余节点，主塔各节点坐标参见表 5-4。

表 5-4 主塔节点编号及坐标

节点编号	370	73	74	75	76	77	78
X 坐标	480	540	540	605	717.5	825	825
Y 坐标	11.904	13.392	13.392	15.004	172.794	15.128	15.128

对应命令流

```
N, 370, 480, 11.904
N, 73, 540, 13.392
N, 74, 540, 13.392
N, 75, 605, 15.004
N, 76, 717.5, 172.794
N, 77, 825, 15.128
N, 78, 825, 15.128
```

## 6. 创建斜拉桥桥面节点

### 1) 创建节点

依次单击：Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Nodes→ In Active CS，弹出

“Create Nodes in Active Coordinate System”对话框。在“NODE Node number”选项的输入栏中输入“79”，在“X,Y,Z Location in active CS”选项的输入栏中分别输入“486”，“12.0528”，“0”，单击“Apply”按钮。弹出“Create Nodes in Active Coordinate System”对话框。在“NODE Node number”选项的输入栏中输入“86”，在“X,Y,Z Location in active CS”选项的输入栏中分别输入“570”，“14.136”，“0”，单击“OK”按钮。

对应命令流

```
N, 79, 486, 12.0528
N, 86, 570, 14.136
```

#### 2) 填充生成其他节点

依次单击：Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Nodes→Fill between Nds，弹出“Fill between Nds”拾取对话框，在图形显示窗口中选择节点 79 和节点 86，弹出“Create Nodes Between 2 Nodes”对话框，单击“OK”按钮。

对应命令流：

```
FILL, 79, 86, 6, , , 1, 1, 1
```

**注意：**完整命令流中上述代码简化为 FILL,79, 86。

#### 3) 重复生成其他节点

重复上述步骤 1) 和步骤 2)，先生成节点 87（639, 15.8472）和节点 94（711, 17.6328），再填充；然后再生成节点 95（723, 17.6576）和节点 102（807, 15.5744），再填充。

对应命令流：

```
N, 87, 639, 15.8472
N, 94, 711, 17.6328
FILL, 87, 94
N, 95, 723, 17.6576
N, 102, 807, 15.5744
FILL, 95, 102
```

#### 4) 复制节点

依次单击：Main Menu→Preprocessor→Modeling→Copy→Nodes→Copy，弹出“Copy Nodes”拾取对话框，选择节点 73 和 102 之间所有节点，单击“Apply”按钮。弹出“Copy Nodes”对话框，在“ITIME”选项的输入栏中输入“2”，在“DX,DY,DZ”选项的输入栏中分别输入“0”，“0”，“17”，在“INC”选项的输入栏中输入“30”，单击“OK”按钮。

对应命令流：

```
NGEN, 2, 30, 73, 102, 1, 0, 0, 17
```

**注意：**其中 2 是复制的次数，包含自己本身；30 是每次复制节点时节点号码的增加量；73, 102, 1 表示依次复制节点 73 到节点 102；0, 0, 17 表示每次复制时在现有坐标系统下，几何位置的改变量。

继续复制节点，再创建节点 371（825, 15.128），此步骤采用的对应命令流：

```
NGEN, 2, 60, 73, 102, 1, 0, 0, -17  
NGEN, 2, 1000, 73, 102, 1, 0, 0, -1.9  
NGEN, 2, 1500, 73, 102, 1, 0, 0, 1.9  
N, 371, 825, 15.128
```

## 7. 创建钢索铰点节点

对应命令流:

```
N, 322, 480, -9.466, 0  
N, 323, 540, -9.466  
N, 324, 605, -9.466  
N, 325, 825, -9.466
```

## 8. 创建斜拉桥节点

先生成节点 354 (605, 38.019) 和节点 368 (605, 98.719)，填充生成其他节点，再创建节点 369 (605, 111.719)。

对应命令流:

```
N, 354, 605, 38.019  
N, 368, 605, 98.719  
FILL, 354, 368  
N, 369, 605, 111.719
```

## 9. 生成主桥单元

### 1) 设置单元属性

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→Default Attribs, 弹出“Meshing Attributes”对话框, 如图 5-25 所示设置好单元属性, 在“[TYPE] Element type number”选项的下拉列表中选择“1 BEAM4”, 在“[MAT] Material number”选项的下拉列表中选择“5”, 在“[REAL] Real constant set number”选项的下拉列表中选择“3”, 单击“OK”按钮。

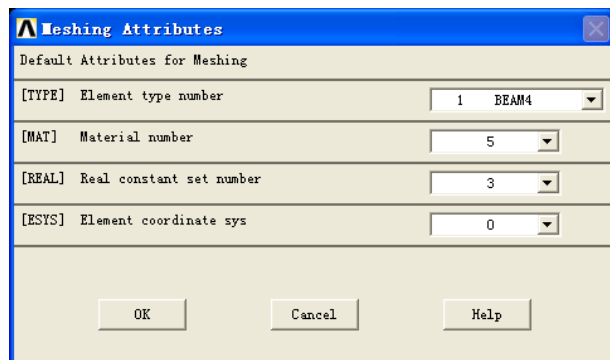


图 5-25 “Meshing Attributes”对话框

对应命令流:

```
TYPE, 1
MAT, 5
REAL, 3
```

## 2) 创建一个单元

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Auto Numbered→Thru Nodes, 弹出“Elements from Nodes”拾取对话框, 在其输入栏中输入“370, 79”, 单击“Apply”按钮。

## 3) 创建其他主桥单元

继续在“Elements from Nodes”拾取对话框中创建单元, 通过拾取其他节点生成其他单元, 主桥各单元和节点编号参见表 5-5。最后单击“OK”按钮关闭该拾取对话框, 退出创建单元。

表 5-5 主桥单元及节点编号表

单元号	1	2	3	4	5
节点 I	370	79	80	81	82
节点 J	79	80	81	82	83
单元号	6	7	8	9	10
节点 I	83	74	84	85	86
节点 J	84	84	85	86	75

对应命令流:

```
E, 370, 79
E, 79, 80
E, 80, 81
E, 81, 82
E, 82, 83
E, 83, 74
E, 74, 84
E, 84, 85
E, 85, 86
E, 86, 75
```

## 4) 通过循环命令流生成其他节点

对应命令流:

```
*DO, I, 74, 86, 1
E, I, I+1000
E, I+1000, I+60
E, I, I+1500
E, I+1500, I+30
*ENDDO
```

```
E, 75, 87
*DO, I, 87, 94, 1
E, I, I+1
*ENDDO
E, 94, 76
E, 76, 95
*DO, I, 95, 101, 1
E, I, I+1
*ENDDO
E, 102, 371
```

## 10. 生成刚臂单元

### 1) 设置单元属性

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→ Default Attribs, 弹出“Meshing Attributes”对话框, 设置好单元属性, 在“[TYPE] Element type number”选项的下拉列表中选择“1 BEAM4”, 在“[MAT] Material number”选项的下拉列表中选择“7”, 在“[REAL] Real constant set number”选项的下拉列表中选择“3”, 单击“OK”按钮。

对应命令流:

```
TYPE, 1
MAT, 7
REAL, 3
```

### 2) 通过循环命令流生成单元

对应命令流:

```
*DO, I, 87, 102, 1
E, I, I+1000
E, I+1000, I+60
E, I, I+1500
E, I+1500, I+30
*ENDDO
```

## 11. 生成桥塔单元

### 1) 设置单元属性

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→Default Attribs, 弹出“Meshing Attributes”对话框, 设置好单元属性, 在“[TYPE] Element type number”选项的下拉列表中选择“1 BEAM4”, 在“[MAT] Material number”选项的下拉列表中选择“4”, 在“[REAL] Real constant set number”选项的下拉列表中选择“12”, 单击“OK”按钮。

对应命令流:

```
TYPE, 1
MAT, 4
REAL, 12
```



2) 创建桥塔单元

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Auto Numbered→Thru Nodes, 弹出“Elements from Nodes”拾取对话框, 在其输入栏中输入“75,354”, 单击“Apply”按钮, 继续弹出“Elements from Nodes”拾取对话框, 在该拾取对话框中创建单元, 通过拾取其他节点生成其他单元, 桥塔各单元及节点编号参见表 5-6。最后单击“OK”按钮关闭该拾取对话框, 退出创建单元。

表 5-6 桥塔单元及节点编号表

桥塔单元	E1	E 2	E 3	E 4	E 5	E 6	E 7	E 8
节点 I	75	354	355	356	357	358	359	360
节点 J	354	355	356	357	358	359	360	361
桥塔单元	E 9	E 10	E 11	E 12	E 13	E 14	E 15	E 16
节点 I	361	362	363	364	365	366	367	368
节点 J	362	363	364	365	366	367	368	369

对应命令流:

```
E, 75, 354
E, 354, 355
E, 355, 356
E, 356, 357
E, 357, 358
E, 358, 359
E, 359, 360
E, 360, 361
E, 361, 362
E, 362, 363
E, 363, 364
E, 364, 365
E, 365, 366
E, 366, 367
E, 367, 368
E, 368, 369
```

12. 生成桥索单元

1) 设置单元属性

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→ Default Attribs, 弹出“Meshing Attributes”对话框, 设置好单元属性, 在 “[TYPE] Element type number” 选项的下拉列表中选择“2 LINK8”, 在 “[MAT] Material number” 选项的下拉列表中选择“6”, 在 “[REAL] Real constant set number” 选项的下拉列表中选择“8”, 单击“OK”按钮。

对应命令流:

TYPE, 2  
MAT, 6  
REAL, 8

2) 创建桥索单元

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Auto Numbered→Thru Nodes, 弹出“Elements from Nodes”拾取对话框, 在其输入栏中输入“75,354”, 单击“Apply”按钮, 继续弹出“Elements from Nodes”拾取对话框, 在该拾取对话框中创建单元, 通过拾取其他节点生成其他单元, 桥索各单元及节点编号参见表 5-7。最后单击“OK”按钮关闭该对话框, 退出创建单元。

表 5-7 桥索单元及节点编号表

索单元	E1	E 2	E 3	E 4	E 5	E 6	E 7	E 8	E 9	E 10	E 11	E 12
节点 I	368	368	366	366	364	364	362	362	360	360	358	358
节点 J	1079	1579	1080	1580	1081	1581	1082	1582	1083	1583	1084	1584
索单元	E1	E 2	E 3	E 4	E 5	E 6	E 7	E 8	E 9	E 10	E 11	E 12
节点 I	356	356	354	354	1087	1587	1088	1588	1089	1589	1090	1590
节点 J	1085	1585	1086	1586	354	354	355	355	356	356	357	357
索单元	E1	E 2	E 3	E 4	E 5	E 6	E 7	E 8	E 9	E 10	E 11	E 12
节点 I	1091	1591	1092	1592	1093	1593	1094	1594	1095	1595	1096	1596
节点 J	358	358	359	359	360	360	361	361	362	362	363	363
索单元	E1	E 2	E 3	E 4	E 5	E 6	E 7	E 8	E 9	E 10	E 11	E 12
节点 I	1097	1597	1098	1598	1099	1599	1100	1600	1101	1601		
节点 J	364	364	365	365	366	366	367	367	368	368		

对应命令流:

E, 368, 1079  
E, 368, 1579  
E, 366, 1080  
E, 366, 1580  
E, 364, 1081  
E, 364, 1581  
E, 362, 1082  
E, 362, 1582  
E, 360, 1083  
E, 360, 1583  
E, 358, 1084  
E, 358, 1584  
E, 356, 1085  
E, 356, 1585

E, 354, 1086  
E, 354, 1586  
E, 1087, 354  
E, 1587, 354  
E, 1088, 355  
E, 1588, 355  
E, 1089, 356  
E, 1589, 356  
E, 1090, 357  
E, 1590, 357  
E, 1091, 358  
E, 1591, 358  
E, 1092, 359  
E, 1592, 359  
E, 1093, 360  
E, 1593, 360  
E, 1094, 361  
E, 1594, 361  
E, 1095, 362  
E, 1595, 362  
E, 1096, 363  
E, 1596, 363  
E, 1097, 364  
E, 1597, 364  
E, 1098, 365  
E, 1598, 365  
E, 1099, 366  
E, 1599, 366  
E, 1100, 367  
E, 1600, 367  
E, 1101, 368  
E, 1601, 368

### 13. 主桥桥墩单元

#### 1) 设置单元属性

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→Default Attribs, 弹出“Meshing Attributes”对话框, 设置好单元属性, 在 “[TYPE] Element type number” 选项的下拉列表中选择 “1 BEAM4”, 在 “[MAT] Material number” 选项的下拉列表中选择 “3”, 在 “[REAL] Real constant set number” 选项的下拉列表中选择 “5”, 单击 OK 按钮。

对应命令流:

```
TYPE, 1  
MAT, 3
```

```
REAL, 5
```

## 2) 创建桥墩单元

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Auto Numbered→Thru Nodes, 弹出“Elements from Nodes”拾取对话框, 在其输入栏中输入“370,322”, 单击“Apply”按钮, 继续弹出“Elements from Nodes”拾取对话框, 在该拾取对话框中创建单元, 在其输入栏中输入“371,325”, 最后单击“OK”按钮关闭该拾取对话框, 退出创建单元。

对应命令流:

```
E, 370, 322  
E, 371, 325
```

## 14. 参照桥墩单元创建主桥中间墩单元

对应命令流:

```
TYPE, 1  
MAT, 3  
REAL, 11  
E, 73, 323  
E, 75, 324
```

## 15. 施加边界条件

### 1) 耦合节点主桥辅墩

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Coupling→Ceqn→Couple DOFs, 弹出“Define Coupled DOFs”拾取对话框, 在其输入栏中输入“73,74”, 单击“Apply”按钮, 弹出“Define Coupled DOFs”对话框, 在“NSET Set reference number”选项的输入栏中输入“44”, 在“Lab Degree-of-freedom label”选项的下拉列表中选择“UY”, 单击“OK”按钮。

对应命令流:

```
CP, 44, UY, 73, 74
```

### 2) 桥墩加全约束

依次单击: Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes, 弹出“Apply U,ROT on Nodes”拾取对话框, 在其输入栏中输入“322,323,324,325”, 单击“Apply”按钮, 弹出“Apply U,ROT on Nodes”对话框, 在“Lab2 DOFs to be constrained”选项的下拉列表中选择“All DOF”, 在“VALUE Displacement value”选项的输入栏中输入“0”, 单击“OK”按钮。

对应命令流:

```
D, 1, ALL, 0  
D, 322, ALL  
D, 323, ALL  
D, 324, ALL  
D, 325, ALL
```

## 16. 进行模态求解

### 1) 选择模态分析

依次单击: Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis, 弹出“New Analysis”对话框, 在“[ANTYPE] Type of analysis”选项组中选择“MODAL”选项, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

### 2) 指定模态分析方法及模态数

依次单击: Main Menu→Solution→Analysis Type→Analysis Options, 弹出“Modal Analysis”对话框, 在“[MODEPT] Mode extraction method”选项组中选择“Block Lanczos”选项, 在“No. of mode to extract”选项的输入栏中输入“30”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
ANTYPE, 2  
MODEPT, LANB, 30
```

### 3) 求解

依次单击: Main Menu→Solution→Solve→Current LS, 弹出“/STATUS Command”文本框及“Solve Current Load Step”对话框, 浏览完毕文本框后单击其右上角关闭按钮。单击“Solve Current Load Step”对话框中的“OK”按钮, ANSYS 开始求解计算, 求解完成后, 弹出“Note”对话框。

对应命令流:

```
SOLVE  
FINISH
```

## 17. 进行谱分析求解

### 1) 选择谱分析

依次单击: Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis, 弹出“New Analysis”对话框, 在“[ANTYPE] Type of analysis”选项组中选择“Spectrum”选项, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

### 2) 指定模态分析方法及模态数

依次单击: Main Menu→Solution→Analysis Type→Analysis Options, 弹出“Spectrum Analysis”对话框, 在“Sptype Type of spectrum”选项组中选择“Single-pt resp”选项, 在“No. of mode for solu”选项的输入栏中输入“30”, 勾选“Calculate elem stresses?”选项的复选框, 设置为“Yes”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
ANTYPE, 8  
SPOPT, SPRS, 30, YES
```

### 3) 设置加速度反应谱

依次单击: Main Menu→Solution→Load Step Opts→Spectrum→SinglePt→Settings, 弹出

“Settings for single-Point Response Spectrum”对话框，在“[SVTYP]Type of response spectr”选项组中选择“Seismic accel”选项，在“SED<sub>X</sub>,SED<sub>Y</sub>,SED<sub>Z</sub> Coordinates of point”选项的输入栏中分别输入“1”，“1”，“0”，其他选项的输入栏默认为“0”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流：

```
SVTYP, 2
SED, 1, 1
```

#### 4) 定义谱值与频率关系曲线

依次单击：Main Menu→Solution→Load Step Opts→Spectrum→SinglePt→Freq Table，弹出“Frequency Table”对话框，在“Frequency”选项的输入栏中依次输入表 5-8 所示的 FREQ 数据。

对应命令流：

```
FREQ, 0.2500, 0.2632, 0.2778, 0.2941, 0.3125, 0.3333, 0.3571, 0.3846, 0.4167
FREQ, 0.4545, 0.5000, 0.5556, 0.6250, 0.7143, 0.8333, 1.1111, 2.0000, 10.0000
FREQ, 25.0000, 1000.0000
```

表 5-8 谱值 (SV) 与频率 (FREQ) 一览表

NUMBER	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
FREQ	0.2500	0.2632	0.2778	0.2941	0.3125	0.3333	0.3571	0.3846	0.4167	0.4545
SV	0.0797	0.0861	0.0934	0.1018	0.1114	0.1228	0.1362	0.1522	0.1716	0.1955
NUMBER	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
FREQ	0.5000	0.5556	0.6250	0.7143	0.8333	1.1111	2.0000	10.0000	25.0000	1000.0000
SV	0.2255	0.2642	0.3152	0.3851	0.4853	0.4853	0.4853	0.4853	0.2588	0.2167

#### 5) 定义阻尼比值和谱值点

依次单击：Main Menu→Solution→Load Step Opts→Spectrum→SinglePt→Spectr Values，弹出“Spectrum Values-Damping Rating”对话框，在“Damping Rating for this curve”选项的输入栏中输入“0.05”，单击“OK”按钮，弹出“Spectrum Values”对话框，按照表 5-8 所示填入与 FREQ 对应的 SV 值。

对应命令流：

```
SV, 0.05, 0.0797, 0.0861, 0.0934, 0.1018, 0.1114, 0.1228, 0.1362, 0.1522, 0.1716
SV, 0.05, 0.1955, 0.2255, 0.2642, 0.3152, 0.3851, 0.4853, 0.4853, 0.4853, 0.4853
SV, 0.05, 0.2588, 0.2167
```

#### 6) 求解

依次单击：Main Menu→Solution→Solve→Current LS，弹出“STATUS Command”文本框及“Solve Current Load Step”对话框，浏览完毕文本框后单击其右上角关闭按钮。单击“Solve Current Load Step”对话框上的“OK”按钮，ANSYS 开始求解计算，求解完成后，弹出“Note”对话框。

对应命令流：

SOLVE  
FINISH

18. 进行模态扩展求解

1) 选择模态分析

依次单击：Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis，弹出“New Analysis”对话框，在“[ANTYPE] Type of analysis”选项组中选择“MODAL”选项，单击“OK”按钮关闭该对话框。

2) 指定模态扩展求解

依次单击：Main Menu→Solution→Analysis Type→ExpansionPass，弹出“Expansion Pass”对话框，在“[EXPASS] ExpansionPass”选项组中选择“on”选项，单击“OK”按钮关闭该对话框。

3) 指定模态分析方法及模态数

依次单击：Main Menu→Solution→Load Step Opts→ExpansionPass→Single Expand→Expand Modes，弹出“Expand Modes”对话框，在“NMODE No. of modes to expand 选项的输入栏中输入“30”，在“only valid for SPRS and DDAM”选项的输入栏中输入“0.005”，勾选“Elcalc Calculate elem results”选项的复选框，设置为“Yes”，其他默认为“0”，单击OK 按钮。

对应命令流：

ANTYPE, MODAL  
EXPASS, ON  
MXPAND, 30, , , YES, 0.005

4) 求解

依次单击：Main Menu→Solution→Solve→Current LS，弹出“/STATUS Command”文本框及“Solve Current Load Step”对话框，浏览完毕文本框后单击其右上角关闭按钮。单击“Solve Current Load Step”对话框上的“OK”按钮，ANSYS 开始求解计算，求解完成后，弹出“Note”对话框。

对应命令流：

SOLVE  
FINISH

19. 进行谱分析（合并模态）

1) 选择谱分析

依次单击：Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis，弹出“New Analysis”对话框，在“[ANTYPE] Type of analysis”选项组中选择“Spectrum”选项，单击“OK”按钮关闭该对话框。

2) 指定 SRSS 法位移响应计算

依次单击：Main Menu→Solution→Load Step Opts→ Spectrum→Mode Combine，弹出

“Mode Combination Methods”对话框，在“Mode Combination Method→SRSS→SIGNIF”选项的输入栏中输入“0.15”，在“LABEL”选项的下拉列表中选择“Displacement”选项，单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流：

```
ANTYPE, SPECTR
SRSS, 0.15, DISP
```

### 3) 求解

依次单击：Main Menu→Solution→Solve→Current LS，弹出“STATUS Command”文本框及“Solve Current Load Step”对话框，浏览完毕文本框后单击其右上角关闭按钮。单击“Solve Current Load Step”对话框上的“OK”按钮，ANSYS 开始求解计算，求解完成后，弹出“Note”对话框。

对应命令流：

```
SOLVE
FINISH
```

## 20. 进入一般后处理，查看结果

### 1) 查看整座桥模态频率

依次单击：Main Menu→General Postproc→List Results→Detailed Summary，弹出“SET,LIST Command”文本框，如图 5-26 所示，显示结构节点支反力计算结果。

对应命令流：

```
/POST1
SET, LIST
```

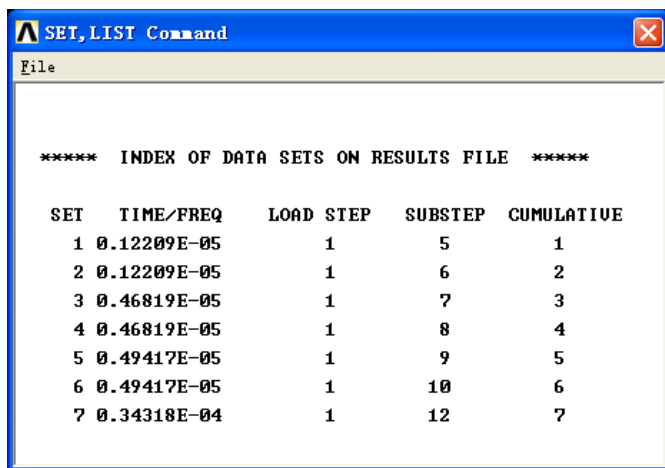


图 5-26 “SET, LIST Command”文本框

### 2) 模态组合分析结果

在命令栏输入窗口中依次输入命令来读取模态组合分析结果文件。



对应命令流:

```
/INP, , mcom
lcwrite, 11                !将载荷工况 11 写入载荷工况文件
LCASE, 11                  !读取载荷工况 11
PRRSOL,                    !如图 5-27 所示为 LCASE,11 时的谱分析反力
```

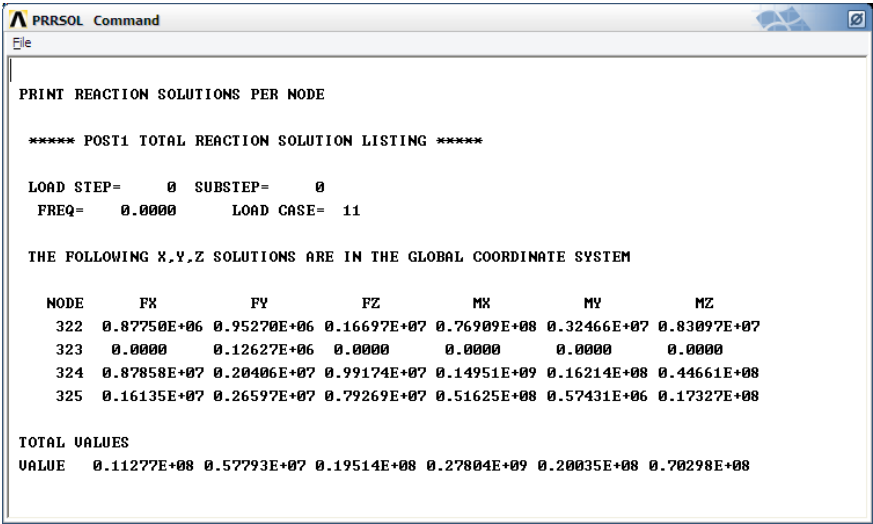


图 5-27 LCASE,11 时的谱分析反力

3) 单独谱分析反力

对应命令流:

```
SET, FIRST
PRRSOL,                    !如图 5-28 所示为 SET,FIRST 时的谱分析反力
```

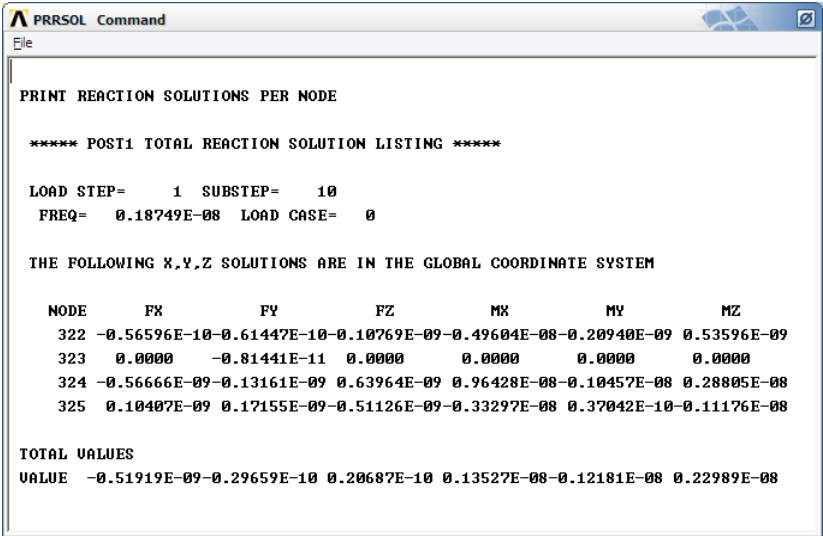


图 5-28 SET,FIRST 时的单独谱分析反力

### 5.5.3 独塔两跨斜拉桥谱分析完整命令流

```

FINISH                                !退出以前模块
/CLEAR, START                         !清除系统中所有数据,读入启动文件设置
! (1) 建立工作文件名和工作标题
/FILNAME, EX5-5
/TITLE, Cable Stayed Bridge
/UNITS, SI
/PREP7                                !进入前处理模块
! (2) 定义单元类型及实常数
ET, 1, BEAM4
ET, 2, LINK8
r, 3, 1, 2, 150, 1, 0.6                !3 号梁单元实常数
rmore,, 9
r, 5, 45, 29, 3000, 1, 0.6            !5 号梁单元实常数
rmore,, 73
r, 7, 1, 2, 5, 150, 1, 0.6            !7 号梁单元实常数
rmore,, 9
r, 11, 75, 1500, 950, 1, 0.6          !11 号梁单元实常数
rmore,, 1900
r, 12, 18, 40, 108, 1, 0.6            !12 号梁单元实常数
rmore,, 100
r, 8, 0.02, 0.0025                    !8 号杆单元实常数
! (3) 定义材料性能参数
MP, EX, 3, 3.45E10                    !输入引桥混凝土梁, 桥墩的弹性模量
MP, PRXY, 3, 0.167                    !输入引桥混凝土梁, 桥墩的泊松比
MP, DENS, 3, 2650                      !输入引桥混凝土梁, 桥墩的密度
MP, EX, 4, 3.55E10                    !输入主塔的弹性模量
MP, PRXY, 4, 0.2                      !输入主塔的泊松比
MP, DENS, 4, 2780                      !输入主塔的密度
MP, EX, 5, 2.1E11                     !输入钢箱梁的弹性模量
MP, PRXY, 5, 0.3                      !输入钢箱梁的泊松比
MP, DENS, 5, 11000                    !输入钢箱梁的密度
MP, EX, 6, 1.9E11                     !输入钢索的弹性模量
MP, PRXY, 6, 0.3                      !输入钢索的泊松比
MP, DENS, 6, 8650                     !输入钢索的密度
MP, EX, 7, 2.1E16                     !输入钢箱梁刚臂的弹性模量
MP, PRXY, 7, 0.3                      !输入钢箱梁刚臂的泊松比
MP, DENS, 7,
! (4) 创建主塔节点
n, 370, 480, 11.904
n, 73, 540, 13.392
n, 74, 540, 13.392

```

n, 75, 605, 15.004  
n, 76, 717.5, 17.794  
n, 77, 825, 15.128  
n, 78, 825, 15.128  
! (5) 创建斜拉桥桥面节点  
n, 79, 486, 12.0528  
n, 86, 570, 14.136  
FILL, 79, 86, 6, , , 1, 1, 1  
n, 87, 639, 15.8472  
n, 94, 711, 17.6328  
fill, 87, 94  
n, 95, 723, 17.6576  
n, 102, 807, 15.5744  
fill, 95, 102  
ngen, 2, 30, 73, 102, 1, 0, 0, 17  
ngen, 2, 60, 73, 102, 1, 0, 0, -17  
ngen, 2, 1000, 73, 102, 1, 0, 0, -1.9  
ngen, 2, 1500, 73, 102, 1, 0, 0, 1.9  
n, 371, 825, 15.128  
! (6) 创建钢索铰点节点  
n, 322, 480, -9.466, 0  
n, 323, 540, -9.466  
n, 324, 605, -9.466  
n, 325, 825, -9.466  
! (7) 创建斜拉桥节点  
n, 354, 605, 38.019  
n, 368, 605, 98.719  
fill, 354, 368  
n, 369, 605, 111.719  
! (8) 生成主桥单元  
TYPE, 1  
MAT, 5  
REAL, 3  
e, 370, 79  
e, 79, 80  
e, 80, 81  
e, 81, 82  
e, 82, 83  
e, 83, 74  
e, 74, 84  
e, 84, 85  
e, 85, 86  
e, 86, 75

```
*do, i, 74, 86, 1                                !循环命令流生成其他节点
e, i, i+1000
e, i+1000, i+60
e, i, i+1500
e, i+1500, i+30
*enddo
e, 75, 87
*do, i, 87, 94, 1
e, i, i+1
*enddo
e, 94, 76
e, 76, 95
*do, i, 95, 101, 1
e, i, i+1
*enddo
e, 102, 371
! (9) 生成刚臂单元
type, 1
mat, 7
real, 3

*do, i, 87, 102, 1                                !循环命令流生成其他节点
e, i, i+1000
e, i+1000, i+60
e, i, i+1500
e, i+1500, i+30
*enddo
! (10) 生成桥塔单元
type, 1
mat, 4
real, 12
e, 75, 354
e, 354, 355
e, 355, 356
e, 356, 357
e, 357, 358
e, 358, 359
e, 359, 360
e, 360, 361
e, 361, 362
e, 362, 363
e, 363, 364
e, 364, 365
e, 365, 366
```

e, 366, 367  
e, 367, 368  
e, 368, 369  
! (11) 生成桥索单元  
type, 2  
mat, 6  
real, 8  
e, 368, 1079  
e, 368, 1579  
e, 366, 1080  
e, 366, 1580  
e, 364, 1081  
e, 364, 1581  
e, 362, 1082  
e, 362, 1582  
e, 360, 1083  
e, 360, 1583  
e, 358, 1084  
e, 358, 1584  
e, 356, 1085  
e, 356, 1585  
e, 354, 1086  
e, 354, 1586  
e, 1087, 354  
e, 1587, 354  
e, 1088, 355  
e, 1588, 355  
e, 1089, 356  
e, 1589, 356  
e, 1090, 357  
e, 1590, 357  
e, 1091, 358  
e, 1591, 358  
e, 1092, 359  
e, 1592, 359  
e, 1093, 360  
e, 1593, 360  
e, 1094, 361  
e, 1594, 361  
e, 1095, 362  
e, 1595, 362  
e, 1096, 363  
e, 1596, 363  
e, 1097, 364

e, 1597, 364

e, 1098, 365

e, 1598, 365

e, 1099, 366

e, 1599, 366

e, 1100, 367

e, 1600, 367

e, 1101, 368

e, 1601, 368

! (12) 主桥桥墩单元

type, 1

mat, 3

real, 5

e, 370, 322

e, 371, 325

! (13) 参照桥墩单元创建主桥中间墩单元

type, 1

mat, 3

real, 11

e, 73, 323

e, 75, 324

! (14) 施加边界条件

cp, 44, uy, 73, 74

D, 1, ALL, 0

d, 322, all

d, 323, all

d, 324, all

d, 325, all

! (15) 进行模态求解

/SOLU

ANTYPE, 2

MODOPT, LANB, 30

SOLVE

FINISH

! (16) 进行谱分析求解

ANTYPE, 8

SPOPT, SPRS, 30, YES

SVTYP, 2

SED, 1, 1

FREQ, 0.2500, 0.2632, 0.2778, 0.2941, 0.3125, 0.3333, 0.3571, 0.3846, 0.4167

FREQ, 0.4545, 0.5000, 0.5556, 0.6250, 0.7143, 0.8333, 1.1111, 2.0000, 10.0000

FREQ, 25.0000, 1000.0000

SV, 0.05, 0.0797, 0.0861, 0.0934, 0.1018, 0.1114, 0.1228, 0.1362, 0.1522, 0.1716

SV, 0.05, 0.1955, 0.2255, 0.2642, 0.3152, 0.3851, 0.4853, 0.4853, 0.4853, 0.4853

```
SV, 0.05, 0.2588, 0.2167
SOLVE
FINISH
! (17) 进行模态扩展求解
ANTYPE, MODAL
EXPASS, ON
MXPAND, 30, , , YES, 0.005
SOLVE
FINISH
! (18) 进行谱分析(合并模态)
ANTYPE, SPECTR
SRSS, 0.15, disp
SOLVE
FINISH
! (19) 进入一般后处理, 查看结果
/POST1
SET, LIST
/INP, , mcom
lcwrite, 11                                !将载荷工况 11 写入载荷工况文件
LCASE, 11                                !读入载荷工况 11
PRRSOL,                                    !如图 5-27 所示为 LCASE,11 时的谱分析反力
SET, FIRST
PRRSOL,                                    !如图 5-28 所示为 SET,FIRST 时的谱分析反力
```

## 本章小结

本章主要讲述了动力学分析的概念, 以及主要分类。不仅分别对模态分析, 谐响应分析, 瞬态分析, 及谱分析进行了详细的介绍, 而且概括了其常用的求解方法, 并结合工程实例给出了详细的案例来介绍 ANSYS 分析步骤和过程。

## 思考题

- (1) 结构动力分析有哪些基本类型, 它们的建模过程和求解方法有何异同?
- (2) 对比桁架桥模态分析和锚固式储液罐模态分析两个实例, 分析步骤中有何异同, 为什么要这样设置?
- (3) 预应力的施加方法有什么特别之处, 不同类型的单元是通过什么办法耦合的?
- (4) 如何在 ANSYS 中设置桥梁的截面属性?
- (5) 在 ANSYS 中为何刚臂的密度均为默认值?

## 常见疑难问题解析

在本章的实例操作过程中，或者在做其他 ANSYS 练习时可能会遇到的一些问题，结合本章汇总如下。

### （1）进行模态分析时，如何理解模态数的问题？

模态，简单地讲就是振型，其每一个固有频率都对应一个振型，一般说系统有多少自由度就有多少固有频率。对于连续体，其自由度可以看做无限，所以有无限多个固有频率，当然就对应无限多个振型，也就是对应无限多个模态，输入模态数为  $N$ ，即需要提取  $N$  阶模态。

模态是结构的固有属性，包括固有频率和振型，不同的结构有不同的模态，模态的形式分为位移模态、应变模态和曲率模态等。

### （2）如何来模拟实现预应力钢筋？

实现预应力钢筋有两种方式：一种方式是通过施加预应变的方法来进行；另一种方式是用温度变化引起的应变模拟预应力。本章中的预应力 T 梁瞬态分析则是采用了第二种方法进行分析的。





## 第 6 章 非线性分析



### 知识点

- 非线性分析概论
- 非线性分析的基本步骤
- 几何非线性分析
- 材料非线性分析
- 状态非线性分析（接触分析）

### 6.1 非线性分析概论

在日常生活中，经常会遇到结构非线性问题。例如，用钉书钉钉书时，金属钉书钉将永久地弯曲成一种形状，如图 6-1（a）所示。一个木架上如果放置了重物，随着时间的流逝它将会越来越向下垂，如图 6-1（b）所示。当汽车或卡车装货时，货车充气轮胎与路面间的接触将随着货物质量的增加而变化，如图 6-1（c）所示。如果将上述例子中的载荷变形用  $F-u$  曲线画出来，则可以发现它们都显示了结构非线性的基本特征，即结构刚度的改变。

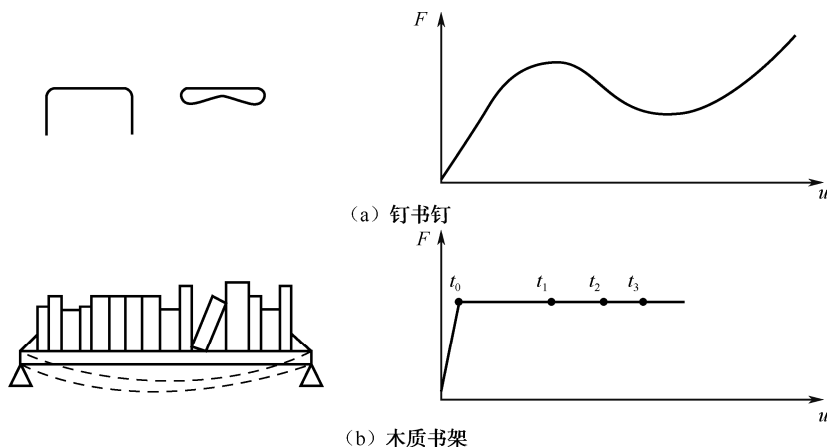


图 6-1 非线性实例

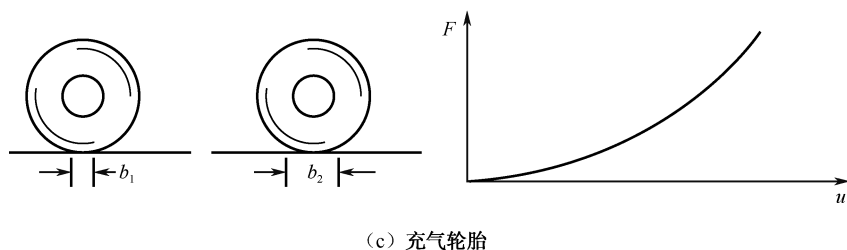


图 6-1 非线性实例 (续)

### 6.1.1 非线性行为的原因

根据引起结构非线性行为的原因，可以将其划分为以下 3 种主要类型。

#### 1. 几何非线性

几何非线性主要针对大变形。几何形状的变化可能会引起结构的非线性响应。例如，图 6-2 所示的钓鱼竿，随着垂向载荷的增加，杆不断弯曲以至力臂明显地减小，导致杆端显示出在较高载荷下不断增长的刚性。几何非线性的特点是大位移和大转动。

#### 2. 材料非线性

材料非线性的应力-应变关系是结构非线性的常见原因，许多因素可以影响材料的应力-应变性质，包括加载历史（如在弹/塑性响应情况下）、环境状况（如温度），以及加载的时间总量（如在蠕变响应情况下）。

#### 3. 状态变化非线性

许多结构表现出一种与状态相关的非线性行为。例如，一根只能拉伸的电缆可能是松的，也可能是绷紧的；轴承套可能是接触的，也可能是不接触的；冻土可能是冻结的，也可能是融化的。这些系统的刚度由于系统状态的改变而变化。状态改变也许和载荷直接有关（如在电缆情况中），也可能是由某种外部原因引起的（如在冻土中的紊乱热力学条件）。接触是一种很普遍的非线性行为。接触是状态变化非线性中一个特殊而重要的子集。

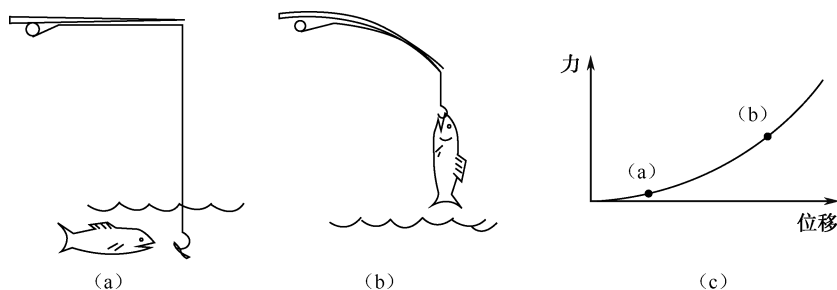


图 6-2 钓鱼竿几何非线性实例

### 6.1.2 非线性分析的特殊性

ANSYS 程序的方程求解器是通过计算一系列的联立线性方程来预测工程系统的响应。然而,非线性结构的行为不能直接用这样一系列的线性方程来表示,需要通过带校正的线性近似来求解非线性问题。

#### 1. 非线性求解方法

在一个载荷步内以几个子步的形式施加载荷,在每个增量的求解完成后,继续进行下一个载荷增量计算之前,需要调整刚度矩阵以反映结构刚度的非线性变化。然而,纯粹的增量近似不可避免地会出现误差积累,导致结果最终失去平衡,如图 6-3 (a) 所示。

ANSYS 程序通过使用牛顿-拉普森迭代近似法(NR 法)克服了上述困难,它迫使解在每个载荷增量的末端达到平衡收敛(在某个允许范围内)。如图 6-3 (b) 所示描述了在单自由度非线性分析中牛顿-拉普森迭代法的使用:①每次求解前,首先估算出残差矢量,该矢量是回复力(对应于单元应力的载荷)和所加外载荷的差值,然后使用非平衡载荷进行线性求解,并且检查收敛性;②如果不满足收敛准则,则重新估算非平衡载荷,修改刚度矩阵,获得新解;③持续这种迭代直到问题收敛。

ANSYS 提供了一系列命令来增强问题的收敛性,包括自适应下降、线性搜索、自动载荷步及二分法等。

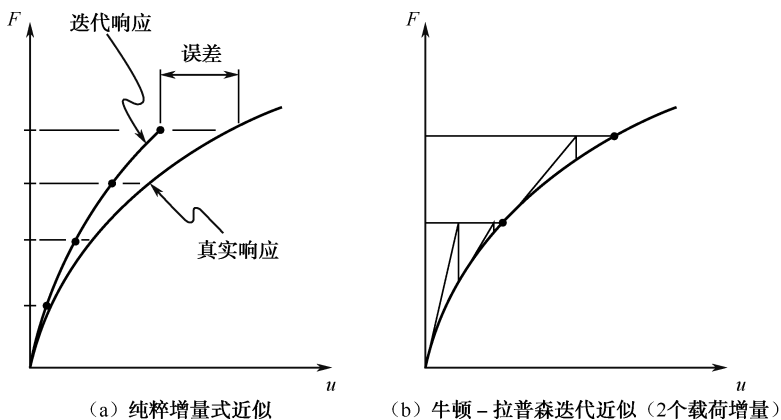


图 6-3 采用纯粹增量近似和牛顿-拉普森迭代近似与真实响应的对比

对于某些物理意义上不稳定系统的非线性静态分析,如果仅使用 NR 法,正切刚度矩阵可能变为降阶矩阵,会导致严重的收敛问题。此时可利用另一种迭代方法,即弧长法来帮助稳定求解。弧长法使 NR 法沿一段弧长来判断收敛,如图 6-4 所示。

#### 2. 非线性求解的组织级别

非线性求解被分成 3 个操作级别,即载荷步、子步和平衡迭代,如图 6-5 所示。

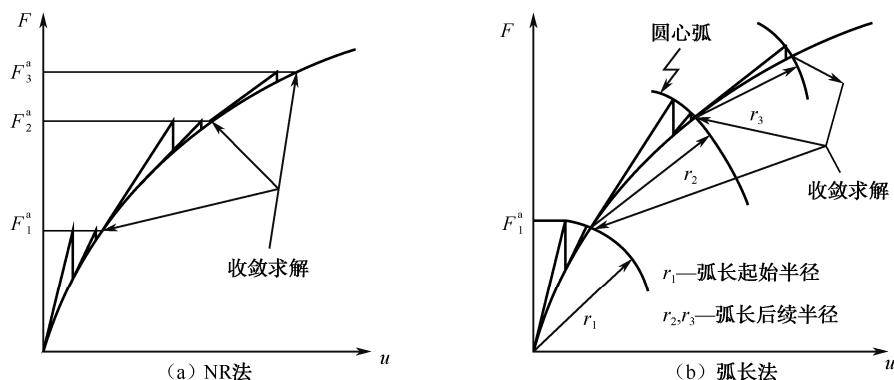


图 6-4 传统的 NR 法和弧长法与真实响应的对比

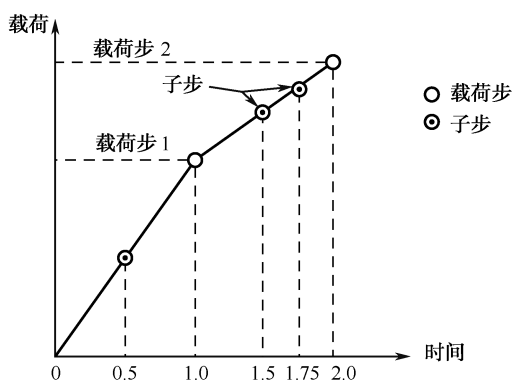


图 6-5 载荷步、子步及平衡迭代与时间的关系图

- “顶层”级别由一定“时间”范围内明确定义的载荷步组成。同时认为载荷在载荷步内是线性变化的。
- 在每一个载荷步内，可以逐步加载，以便控制程序执行多次求解。
- 在每一子步内，程序将进行一系列平衡迭代以获得收敛的解。

## 6.2 非线性分析的基本步骤

尽管非线性分析比线性分析变得更加复杂，但处理基本相同。跟任何一种静态分析方法相似，处理流程主要由 3 个步骤组成：前处理（建模和划分网格）、加载求解和结果分析（后处理）。只是在分析的过程中，添加了需要的非线性特性。

### 6.2.1 前处理

虽然非线性分析涉及一些特殊的单元及非线性的材料属性，但在前处理上基本跟线性静力分析一致。如果模型中包含有大应变效应，应力-应变数据则必须依据真实应力和真实（或对数）应变来表示。

## 6.2.2 加载求解

在前处理完成后，需要设置：分析类型、求解选项、载荷步选项等，最后加载求解。对于非线性分析而言，最重要的是设置求解器选项，其访问路径都跟线性分析是相同的。下面重点介绍一下求解控制器的选项。

**注意：**定义分析类型和分析选项时，分析类型和分析选项在第一个载荷步后（也就是发出了第一个求解命令后）不能改变。

进入求解控制器，依次单击：Main Menu→Solution→Analysis Type→Sol'n Control，弹出“Solution Controls”对话框，如图 6-6 所示。

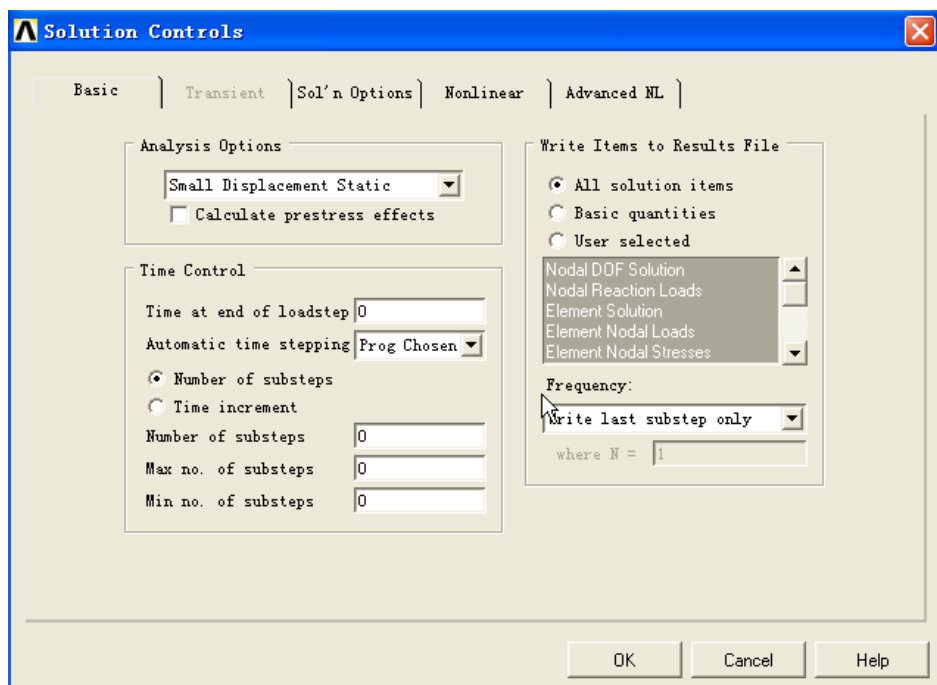


图 6-6 “Solution Controls”对话框

由图 6-6 可以看到，该对话框主要包括 5 个选项卡，即基本选项卡（Basic）、瞬态选项卡（Transient）、求解选项卡（Sol'n Options）、非线性选项卡（Nonlinear）和高级非线性选项卡（Advanced NL）。

静力分析中已经介绍了常用的分析类型及分析选项，下面主要介绍其他的求解器选项。

### 1. 设置求解器选项卡

在非线性结构静力分析中可以设置的基本选项主要包括以下几个方面。

（1）如果是开始一项新的分析，在设置分析类型和非线性选项时，选择“Large Displacement Static”选项，需要注意的是并不是所有的非线性分析都将产生大变形。

（2）进行时间选项设置，需要注意这项操作可以在任何一个载荷步更改。

(3) 非线性分析要求在每一个载荷步内有多个子步或时间步, 分别对应于“NSUBST”和“DELTIM”选项(这两者是等效的)。NSUBST 选项是指定在一个载荷步内使用的子步数; 而 DELTIM 选项明确地定义时间步长。如果自动时间步长是关闭的, 那么整个载荷步都将采用起始子步长。

(4) 在“Solution Controls”对话框, 默认输出为最后一个子步的数据, 即“Write last substep only”, 可以改为每隔  $N$  个子步或者输出每个子步数据。

## 2. 设置高级分析求解器选项

下面介绍 ANSYS 中非线性算法求解器, 主要有稀疏矩阵求解器 (SPARSE DIRECT SOLVER)、预条件共轭梯度迭代求解器 (PCG SOLVER) 和波前直接求解器 (FRONT DIRECT SLOVER) 3 种。

稀疏矩阵求解器是直接解法, 功能非常强大, 一般默认用稀疏矩阵求解器求解。对于子结构计算则默认为波前直接求解器求解; 对于 3D 实体模型而言采用预条件共轭梯度迭代求解器可能是最优的, 但对于结构刚度严重病态时, 迭代不易收敛。

用户可根据以下几条准则选择适当求解器来进行非线性结构的分析:

(1) 对于 BEAM 单元结构、SHELL 单元结构, 或者以这两种单元为主的结构, 采用稀疏矩阵求解器;

(2) 对于 3D SOLID 结构, 选择 PCG 求解器;

(3) 当结构可能出现病态时, 选择稀疏矩阵求解器。

## 3. 设置高级载荷步选项

可以在“Solution controls”对话框中设置的高级载荷步选项主要包括以下几个方面。

(1) Time (TIME), 每一个载荷步末端给定的 TIME 参数识别出载荷步和子步。

(2) 时间步的数目 (NSUBST) 和时间步长 (DELTIM)。

(3) 渐进式或阶跃式的加载。

(4) 自动时间分步 (AUTOTS), 等等。

另外, 关于施加载荷和求解, 载荷施加可以参看第 2 章载荷施加部分进行操作, 最后求解即可。

## 6.2.3 后处理

非线性静态分析的结果主要有位移、应力、应变, 以及反力。可以用通用后处理器 (POST1) 和时间历程后处理器 (POST26) 来观察这些结果。

**注意:** 用 POST1 一次仅可以读取一个子步, 且该子步的数据结果已经写入 Jobname.rst。

### 1. 要记住的要点

(1) 用 POST1 考察结果, 数据库中的模型必须与求解时的为同一模型。

(2) 结果文件 (Jobname.rst) 必须存在, 并且是可读取的。

## 2. 利用 POST1 作为后处理

### 1) 进入 POST1 通用后处理

命令: /POST1

GUI 操作路径:

Main Menu→General Postproc

### 2) 读取子步结果数据

可以依据载荷步和子步号或者时间来识别结果文件。

命令: SET

GUI 操作路径:

Main Menu→General Postproc→Read Results→Load step

**注意:** 如果读者指定了一个没有结果可用的时刻, ANSYS 程序会按照线性插值来计算出那一时刻的结果。在非线分析中, 这种线性内插通常将导致某些精度损失, 如图 6-7 所示。因此, 对于非线性分析, 建议选取子载荷步时间点来进行后处理。

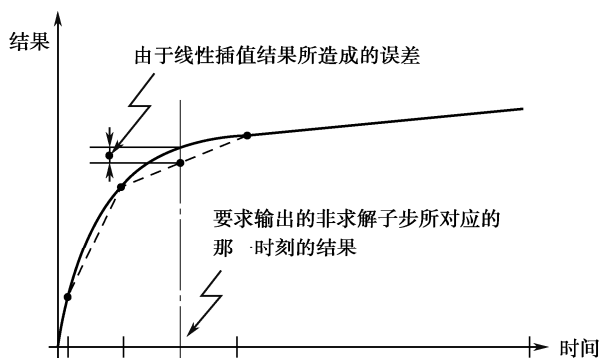


图 6-7 非线性结果的线性插值可能引起的误差

## 3. 显示变形结果

### 1) 显示变形图

命令: PLDISP

GUI 操作路径:

Main Menu→General Postproc→Plot Results→Deformed Shapes

在大变形分析中, 一般优先使用真实比例显示 (IDSCALE,,1)。

### 2) 显示变形云图

命令: PLNSOL 或者 PLESOL

GUI 操作路径:

Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 或 Element Solu

### 3) 利用单元表格

命令: PLETAB, PLLS

GUI 操作路径:

Main Menu→General Postproc→Element Table→Plot Element Table

Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot/Line Elem Res

### 4) 列表显示

命令: PLETAB, PLLS

PRNSOL (节点结果)

PRESOL (单元结果)

PRRSOL (反力)

PRETAB

PRITER (子步迭代数)

NSORT

ESORT

GUI 操作路径:

Main Menu→General Postproc→List Results→Nodal Solution

Main Menu→General Postproc→List Results→Element Solution

Main Menu→General Postproc→List Results→Reaction Solution

### 5) 将结果映射到路径

命令: PLPATH 和 PLPAGM

GUI 操作路径:

Main Menu→General Postproc→Path Operations

## 4. 利用 POST26 作为后处理

采用 POST26 (时间历程后处理器) 可以观察整个时间历程的结果, 还可以比较一个 ANSYS 变量对另一个变量的关系。例如, 用图形表示某一节点处的位移与三相对应的施加载荷的关系, 或者列出某一节点处的塑性应变和对应的 TIME 值之间的关系。常用的 POST26 后处理步骤如下:

#### 1) 进入时间历程后处理器

命令: POST26

GUI 操作路径:

Main Menu→TimeHist Postpro

#### 2) 定义变量

命令: NSOL (节点结果)

ESOL (单元结果)

RFORCL

GUI 操作路径:

Main Menu→Time Hist Postproc→Define Variables



### 3) 画曲线或者列表显示变量

命令: PLVAR (图形中的变量)

PRVAR

EXTREM (列表变量)

GUI 操作路径:

Main Menu→TimeHist Postprac→Graph Variables

Main Menu→TimeHist Postproc→List Variables

Main Menu→TimeHist Postproc→List Extremes

## 6.3 几何非线性分析

几何形状的变化会引起结构的非线性响应, 几何非线性分析主要是针对大变形的分析。

### 6.3.1 概述

通常假定在小转动(小挠度)和小应变中变形足够小, 以至可以不用考虑由变形引起的结构刚度阵变化。在大变形中, 变形体几何形态的改变将明显影响物体的载荷-位移(如刚度)特性, 但几何非线性并不只是指大位移, 还包括几何状态改变所引起的任何结构响应的变化, 如大应变、大位移和大旋转等。一般来说这类问题总是非线性的, 需要进行迭代获得一个精确的解。

#### 1. 大应变效应

一个结构组成单元的方向和刚度决定了它的总刚度。当一个单元的节点经历位移后, 这个单元可以以两种方式对总体结构刚度的改变作出贡献。

(1) 第一种方式。如果这个单元的形状改变, 它的单元刚度将改变, 如图 6-8 (a) 所示。

(2) 第二种方式。如果这个单元的取向改变, 它的局部刚度也将改变, 如图 6-8 (b) 所示。

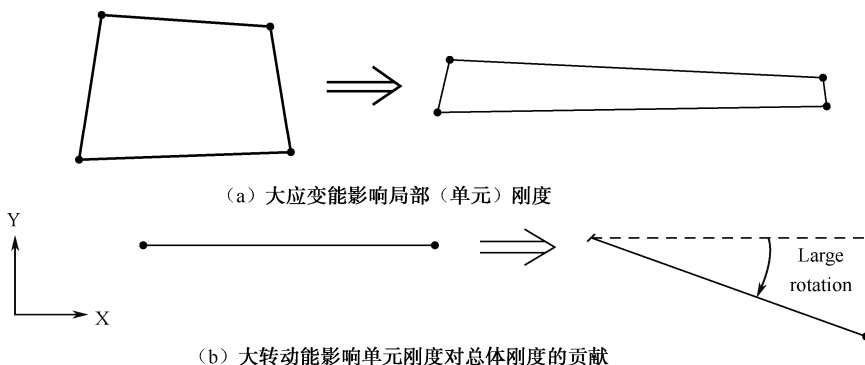


图 6-8 大应变和大转动

在大应变分析中需要通过迭代求解来得到正确的位移。

命令: NLGEOM, ON

GUI 操作路径:

Main Menu→Solution→Analysis Options

对于大多数实体单元, 包括所有的大应变和超弹性单元, 以及部分的壳单元, 大应变特性都适用。

大变形过程在理论上并没有限制单元的变形和转动。为了保持精度要求就必须保证应变增量足够小, 因此总载荷应要细化成很多小步来加载。

命令: NSUBST, DELTIM, AUTOTS

GUI 操作路径:

Main Menu→Solution→Time/Prequent

## 2. 应力-应变

在大应变求解中, 所有应力-应变输入和结果将依据真实应力和真实应变(或对数应变)。一维时, 真实应变将表示为

$$\varepsilon = \ln(l/l_0)$$

对于响应的小应变区, 真实应变和工程应变基本上是一致的。要从小工程应变转换成对数应变, 即

$$\varepsilon_{\ln} = \ln(1 + \varepsilon_{\text{eng}})$$

要从工程应力转换成真实应力, 即

$$\sigma_{\text{true}} = \sigma_{\text{eng}}(1 + \varepsilon_{\text{eng}})$$

这种应力转化仅对不可压缩塑性应力-应变数据是有效的。

为了得到可接受的结果, 对真实应变超过 50% 的塑性分析, 应使用大应变单元 (VISCO106, 107 及 108)。

## 3. 单元的形状

在大应变分析的迭代过程中任何表现低劣的单元形状(如大的纵横比, 过度的顶角, 以及具有负面积的已扭曲单元)都将是有害的。因此, 需要注意单元的原始形状和单元已扭曲的形状。如果已扭曲的网格是不能接受的, 可以人工改变初始单元形状以产生合理的最终结果, 如图 6-9 所示。

## 4. 小应变大转动

在所有梁单元和大多数壳单元中, 以及许多非线性单元中这个特性(大转动)总是可用的。在一个大挠度分析中, 单元的转动可能会很大, 但是应变假定是小的。

命令: NLGEOM, ON

GUI 操作路径: Main Menu→Solution→Analysis Options

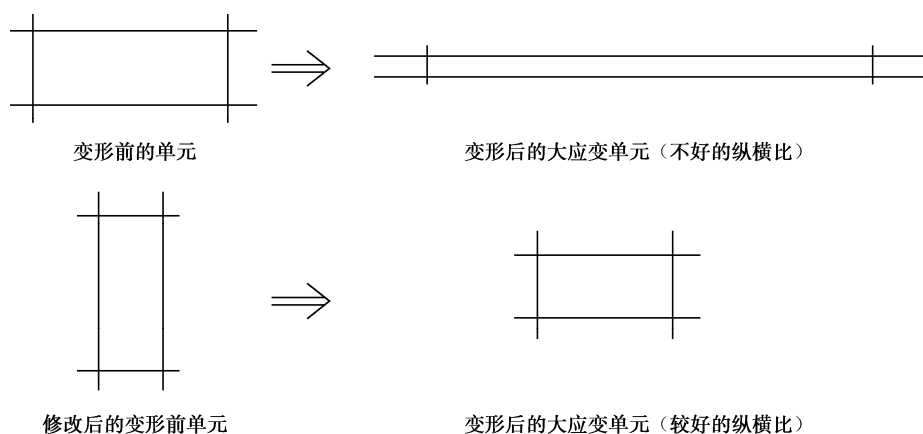


图 6-9 大应变分析中通过改变初始单元形状避免低劣单元形状的出现

### 5. 应力刚化

结构的面外刚度有时会受到面内应力状态的严重影响。这种面内应力和面外刚度的耦合即应力刚化，在高应力的薄结构中最明显的，如缆索或薄膜。

尽管应力刚化理论假定单元的转动和应变是小的，但在某些结构的系统中，如图 6-10 (a) 所示，刚化应力仅可以通过进行大挠度分析得到。而在其他的系统中，如图 6-10 (b) 所示，刚化应力可采用小挠度或线性理论得到。

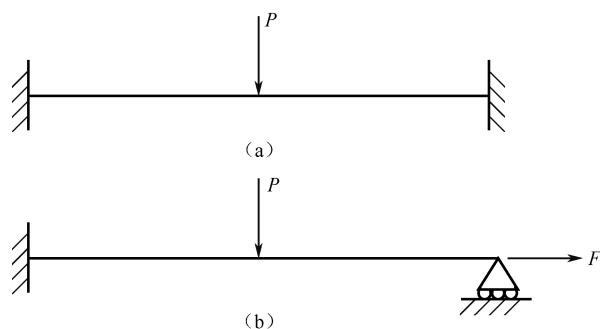


图 6-10 应力刚化的梁

要在第二类系统中使用应力硬化，必须在第一个载荷步中使用命令：SSTIF, ON (GUI 操作路径：Main Menu→Solution→Analysis Options)。ANSYS 程序通过生成和使用一个称做“应力刚化矩阵”的辅助刚度矩阵来考虑应力刚化效应。

大应变和大挠度分析过程理论上包括初始应力的影响，对于大多数单元，会自动包括初始硬化效应。

命令：NLGEOM, ON

GUI 操作路径：

Main Menu→Solution→Analysis Options

## 6. 旋转软化

旋转软化是指通过动态质量效应调整（软化）旋转物体的刚度矩阵。这种调整近似于在小挠度分析中考虑大挠度圆周运动引起的几何尺寸的变化。它通常与由旋转物体的离心力所产生的预应力[PSTRES]（GUI 操作路径：Main Menu→Solution→Analysis Options）一起使用，它不应和其他变形非线性、大挠度和大应变等一起使用

命令：旋转软化项目 OMEGA 命令中的 KPSIN 来激活

GUI 操作路径：

Main Menu→Preprocessor→Loads→-Loads-Apply→-Structural-Other→Angular Velocity

### 6.3.2 实例分析：悬臂梁屈曲分析

#### 1. 问题描述

如图 6-11 所示，一正六面体悬臂梁模型，底端固定，另一端受  $F=100\text{N}$  轴向力，发生失稳。

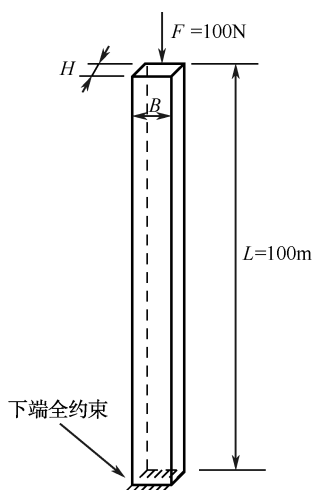


图 6-11 悬臂梁模型示意图

梁的几何尺寸： $L=100\text{m}$ ； $B=H=0.5\text{m}$ 。

梁的材料参数：弹性模量  $E=30\text{Mpa}=3\text{e}7\text{Pa}$ ；泊松比  $\nu=0.3$ 。

#### 2. 问题分析

该问题可以看做杆类构件非线性屈曲问题。

首先计算其临界屈曲载荷。 $F_c = \pi^2 EI / (4L^2) = \pi^2 EBH^3 / (48L^2) = 38.5\text{N}$ ，轴向力  $F$  超过了临界载荷  $F_c$  发生失稳。因此，该问题属于细长杆的非线性屈曲问题。选择梁为研究对象，建立几何模型，选择 BEAM3 梁单元进行求解。

#### 3. 建立工作文件名和工作标题

##### 1) 定义工作文件名

依次单击：Utility Menu→File→Change Jobname，弹出“Change Jobname”对话框。在“[/FILNAM] Enter new jobname”选项的输入栏中输入工作文件名“EX6-1”，勾选“New log and error files”选项的复选框，设置为“Yes”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流：

```
FILNAME, EX6-1
```

##### 2) 定义工作标题

依次单击：Utility Menu→File→Change Title，弹出“Change Title”对话框，在“[/TITLE] Enter new title”选项的输入栏中输入“I Beam Model”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
TITLE, I Beam Model
```

### 3) 定义单位制

在命令栏输入窗口中输入“/UNITS, SI”，选取采用国际单位制。

对应命令流:

```
UNITS, SI
```

## 4. 定义单元类型及实常数

### 1) 定义单元类型

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete, 弹出“Element Types”拾取对话框。单击“Add...”按钮, 弹出“Library of Element Types”对话框, 在“Library of Element Types”选项的左列表框中选择“Structural→Beam”选项, 右列表框中选择“2D elastic3”选项, 在“Element Type reference number”选项的输入栏中输入“1”(默认), 单击“OK”按钮关闭该对话框。单击“Element Types”拾取对话框中的“Close”按钮。

对应命令流:

```
ET, 1, BEAM3
```

### 2) 定义实常数

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Real Constants→Add/Edit/Delete, 弹出“Real Constants”拾取对话框, 单击“Add...”按钮, 弹出“Element Type for Real Constants”对话框, 单击“OK”按钮, 弹出“Real Constants for BEAM3”对话框, 在“AREA”选项的输入栏中输入“0.25”, 在“IZZ”选项的输入栏中输入“52083e-7”, 在“HEIGHT”选项的输入栏中输入“0.5”。单击“OK”按钮关闭该对话框。单击“Real Constants”拾取对话框中的“Close”按钮, 退出实常数设置。

对应命令流:

```
R, 1, 0.25, 52083e-7, 0.5
```

## 5. 定义材料性能参数

### 1) 定义材料

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Material Models, 弹出“Define Material Model Behavior”对话框。在“Material Models Available”选项中依次单击: Structural→Linear→Elastic→Isotropic, 弹出“Linear Isotropic Properties for Material Number 1”对话框, 在“EX”选项的输入栏中输入“30e6”, 在“PRXY”选项的输入栏中输入“0.3”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

### 2) 退出材料设置

在“Define Material Model Behavior”对话框中, 依次单击: Material→Exit (或者直接单击右上角关闭按钮), 关闭该对话框, 退出材料属性设置。

对应命令流:

```
MP, EX, 1, 30e6
MP, PRXY, 1, 0.3
```

## 6. 建立几何模型、划分网格

### 1) 创建节点

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Nodes→In Active CS, 弹出“Create Nodes in Active Coordinate System”对话框。在“NODE Node number”选项的输入栏中输入“1”, 在“X,Y,Z Location in active CS”选项的输入栏中分别输入“0”, “0”, “0”, 单击“Apply”按钮, 再次弹出“Creat Nodes in Active Coordinate System”对话框。在“NODE Node number”选项的输入栏中输入“11”, 在“X,Y,Z Location in active CS”选项的输入栏中分别输入“0”, “100”, “0”, 单击“OK”按钮。

对应命令流:

```
N, 1, 0, 0
N, 11, 0, 100
```

### 2) 打开节点编号和单元编号显示控制

依次单击: Utility Menu→PlotCtrls→Numbering, 弹出“Plot Numbering Controls”对话框, 勾选“NODE Node numbers”选项的复选框, 设置为“On”, 在“Elem/Attrib numbering”选项的下拉列表中选择“Element numbers”, 单击“OK”按钮。

对应命令流:

```
/PNUM, NODE, 1
/PNUM, ELEM, 1
```

### 3) 创建其他节点

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Nodes→Fill between Nds, 弹出“Fill between Nds”拾取对话框, 在图形显示窗口中选择节点 1 和节点 11。弹出“Create Nodes Between 2 Nodes”对话框, 单击“OK”按钮。

对应命令流:

```
FILL,1,11,9,,1,1,1,
```

**注意:** 完整命令流中上述代码简化为 FILL。

## 7. 生成单元

### 1) 创建一个单元

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Auto Numbered→Thru Nodes, 弹出“Elements from Nodes”拾取对话框, 在图形窗口拾取节点 1 和节点 2, 单击“OK”按钮, 在图形窗口中节点 1 和节点 2 之间将生成一个梁单元 1。

对应命令流:

```
E, 1, 2
```

## 2) 创建其他单元

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Copy→Elements→Auto Numbered, 弹出“Copy Elms Auto-Num”拾取对话框, 在图形窗口拾取单元 1, 单击“OK”按钮, 弹出“Copy Elements (Automatically-Numbered)”对话框, 在“ITIME Total number of copies”选项的输入栏中输入“10”, 在“NINC Node number increment”选项的输入栏中输入“1”, 单击“OK”按钮。

对应命令流:

```
EGEN, 10, 1, 1
```

## 8. 加载求解

### 1) 定义求解类型

依次单击: Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis, 弹出“New Analysis”对话框, 在“[ANTYPE] Type of analysis”选项组中选择“Static”选项, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
ANTYPE, STATIC
```

### 2) 考虑预应力选项

依次单击: Main Menu→Solution→Analysis Type→Sol'n Controls, 弹出“Solution Controls”对话框, 勾选“Basic”选项的复选框, 设置为“Calculate prestress effects”。单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
PSTRES, ON
```

### 3) 施加位移全约束

依次单击: Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes, 弹出“Apply U,ROT on Nodes”拾取对话框, 在图形窗口中选取节点 1, 单击“OK”按钮。弹出“Apply U,ROT on Nodes”对话框, 在“Lab2 DOFs to be constrained”选项的下拉列表中选择“All DOF”, 在“VALUE Displacement value”选项的输入栏中输入“0”, 单击“OK”按钮。

对应命令流:

```
D, 1, ALL, 0
```

### 4) 施加集中载荷

依次单击: Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Force/Moment→On Nodes, 弹出“Apply F/M on Nodes”拾取对话框, 在图形窗口中选取节点 11, 单击“OK”按钮。弹出“Apply F/M on Nodes”对话框, 在“Lab Direction of force/mom”选项的下拉列表中选择“FY”, 在“VALUE Force/moment value”选项的输入栏中输入“-100”, 单击“OK”按钮。

对应命令流:

```
F, 11, FY, -100
```

#### 5) 求解

依次单击: Main Menu→Solution→Solve→Current LS, 弹出“/STATUS Command”文本框及“Solve Current Load Step”对话框, 浏览完毕文本框后单击其右上角关闭按钮。单击“Solve Current Load Step”对话框上的“OK”按钮, ANSYS 开始求解计算, 求解完成后, 弹出“Note”对话框, 单击“Close”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
SOLVE
```

### 9. 屈曲分析求解

#### 1) 定义求解类型

依次单击: Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis, 弹出“New Analysis”对话框, 在“[ANTYPE] Type of analysis”选项组中选择“Eigen Buckling”选项, 单击“OK”按钮。

对应命令流:

```
ANTYPE, BUCKLE
```

#### 2) 设定屈曲分析选项

依次单击: Main Menu→Solution→Analysis Type→Analysis Options, 弹出“Eigenvalue Buckling Options”对话框, 在“NMODE No. of mode to extract”选项的输入栏中输入“4”, 单击“OK”按钮。

对应命令流:

```
BUCOPT, LANB, 4
```

#### 3) 指定扩展求解

依次单击: Main Menu→Solution→Load Step Opts→Expansion Pass→Single Expand→Expand Modes, 弹出“Expand Modes”对话框, 在“NMODE No. of mode to extract”选项的输入栏中输入“4”, 单击“OK”按钮。

对应命令流:

```
MXPAND, 4
```

#### 4) 求解

依次单击: Main Menu→Solution→Solve→Current LS, 弹出“/STATUS Command”文本框及“Solve Current Load Step”对话框, 浏览完毕文本框后单击其右上角关闭按钮。单击“Solve Current Load Step”对话框中的“OK”按钮, ANSYS 开始求解计算, 求解完成后, 弹出“Note”对话框, 单击“Close”按钮。

对应命令流:

```
SOLVE
```



## 10. 进入一般后处理模块，查看结果

### 1) 读入第一步结果

依次单击：Main Menu→General Postproc→Read Results→First Set。

对应命令流：

```
SET, FIRST
```

### 2) 查看第一阶屈曲模态

依次单击：Main Menu→General Postproc→Plot Results→Deformed Shape，弹出“Plot Deformed Shape”对话框，在“KUND Items to be plotted”选项的下拉列表中选择“Def+undeformed”，单击“OK”按钮关闭该对话框。显示梁一阶模态，如图 6-12 所示。

对应命令流：

```
PLDISP, 1
```

### 3) 读入第二至第四步结果

依次单击：Main Menu→General Postproc→Read Results→Next Set，采用上述方法即可显示第二至第四阶模态，如图 6-13 至图 6-15 所示。

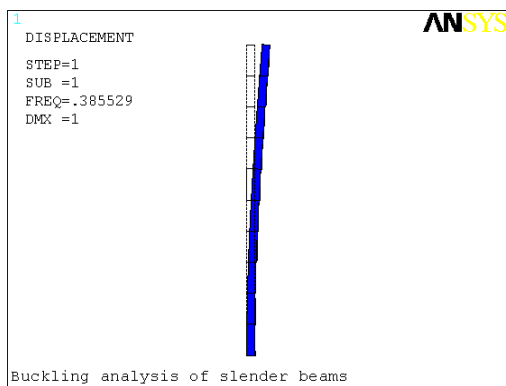


图 6-12 图形显示一阶模态

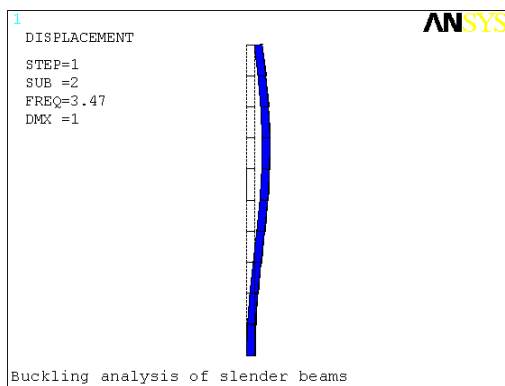


图 6-13 图形显示二阶模态

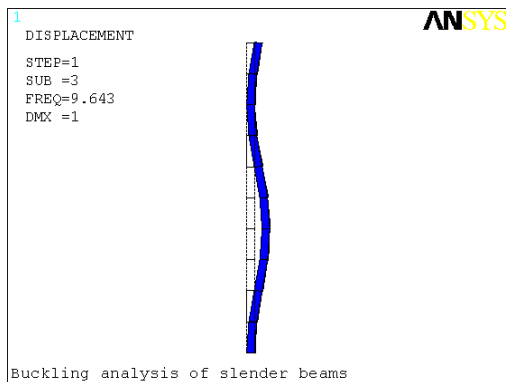


图 6-14 图形显示三阶模态

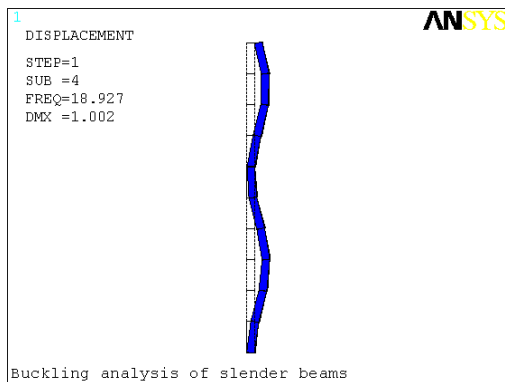


图 6-15 图形显示四阶模态

对应命令流:

```
SET, NEXT
PLDISP, 1
```

## 11. 悬臂梁屈曲分析完整命令流

```
FINISH                                !退出以前模块
/CLEAR, START                         !清除系统中所有数据, 读入启动文件设置
! (1) 建立工作文件名和工作标题
/FILNAME, EX6-1                       !指定当前工程的文件名
/TITLE, I Beam Model                 !定义标题
/UNITS, SI                           !采用国际单位制
/PREP7                                !进入前处理模块
! (2) 定义单元类型及实常数
ET, 1, BEAM3                          !选择梁单元
R, 1, 0.25, 52083e-7, 0.5           !设置单元实常数
! (3) 定义材料性能参数
MP, EX, 1, 30e6                      !输入材料弹性模量
MP, PRXY, 1, 0.3                    !输入材料泊松比
! (4) 建立几何模型、划分网格
N, 1                                  !生成节点 1, 坐标 (0, 0)
N, 11, 0, 100                       !生成节点 11, 坐标 (0, 100)
/PNUM, NOOE, 1
/PNUM, ELEM, 1
FILL                                  !在节点 1 和节点 11 之间填充, 生成其他节点
! (5) 生成单元
E, 1, 2                              !在节点 1 和节点 11 之间生成单元 1
EGEN, 10, 1, 1                      !递增生成其他单元
FINISH                                !退出前处理模块
! (6) 加载求解
/SOLU                                  !进入求解模块
ANTYPE, STATIC                       !定义结构分析类型为静力分析
PSTRES, ON                           !考虑预应力效应
D, 1, ALL, 0                         !对节点 1 施加所有方向的位移约束
F, 11, FY, -100                     !在节点 11 上施加-Y方向的集中载荷 100N
SOLVE                                !发出求解命令
FINISH                                !退出求解模块
! (7) 屈曲分析求解
/SOLU
ANTYPE, BUCKLE                       !指定分析类型为屈曲分析
BUCOPT, LANB, 4                     !指定提取屈曲阶数前四阶
MXPAND, 4                            !将四阶振型写入结果文件
SOLVE                                !发出求解命令
```

FINISH	!退出求解模块
! (8) 进入一般后处理模块, 查看结果	
/POST1	!进入一般后处理模块
SET, FIRST	!读入第一步结果
PLDISP, 1	!显示结构一阶模态图, 保留未变形结构轮廓
SET, NEXT	!读入下一步结果
PLDISP, 1	!显示结构二阶模态及三阶、四阶模态图, 保留未变形结构轮廓
FINISH	!退出后处理模块 POST1

### 6.3.3 实例分析：二力杆件的大变形分析

#### 1. 问题描述

在实际工程中, 由于钢模板制作不精细或者在搬运模板过程中受到碰撞、挤压等外力作用, 常常会造成模板某处凸起, 在活载、恒载作用下或搬运过程中, 凸起处常常会突然变成下凹状态。这一现象被称为油罐效应, 通常采用桁架的失稳模型进行几何非线性简化分析。

#### 2. 问题分析

假设杆的面积  $A=10\text{mm}^2$ , 杆长  $L=0.5\text{m}$ ; 其材料参数: 弹性模量  $E=210\text{GPa}$ , 泊松比  $\nu=0.3$ ; 载荷:  $F_n=1000\text{N}$ 。杆与水平面夹角为  $5^\circ$ , 两杆的底端固定, 中间铰接。

其模型如图 6-16 所示, 采用 LINK1 单元构成二力杆, 左右两端完全约束, 在中间节点处加集中力。

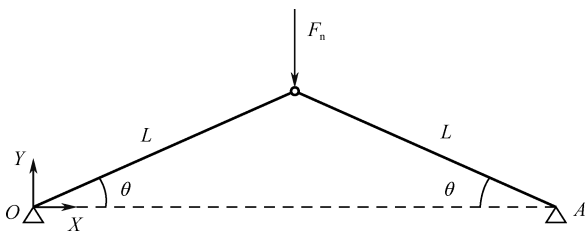


图 6-16 二力杆件模型示意图

#### 3. 建立工作文件名和工作标题

##### 1) 定义工作文件名

依次单击: Utility Menu→File→Change Jobname, 弹出“Change Jobname”对话框, 在“[/FILNAM] Enter new jobname”选项的输入栏中输入工作文件名“EX6-2”, 勾选“New log and error files”选项的复选框, 设置为“Yes”, 然后单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
/FILENAME, EX6-2
```

## 2) 定义工作标题

依次单击: Utility Menu→File→Change Title, 弹出“Change Title”对话框, 在“[/TITLE] Enter new title”选项的输入栏中输入“Large Deformation Analysis Of Two Force Bars”, 然后单击“OK”按钮。

对应命令流:

```
/TITLE, Large Deformation Analysis Of Two Force Bars
```

## 4. 定义参数变量

### 1) 采用角度为度量

依次单击: Utility Menu→Parameters→Angular Units, 弹出“Angular Units for Parametric Functions”对话框, 在“\*AFUN”选项的下拉列表中选择“Degrees DEG”, 单击“OK”按钮。

### 2) 定义参数

依次单击: Utility Menu→Parameters→Scalar Parameters, 弹出“Scalar Parameters”对话框, 在“Selection”选项的输入栏中输入“L=100”, 单击“Accept”按钮, 用同样的方法生成其余参数变量, 各参数变量参见表 6-1。完成后单击“Close”按钮。

表 6-1 参数变量及其对应值

参数变量	$L$	CTA	AREA	$F_n$	$L_1$	$H_1$
对应值	100	5	10	1000	$2 \times L \times \cos(\text{CTA})$	$L \times \sin(\text{CTA})$

对应命令流:

```
*AFUN, DEG
*SET, L, 100
*SET, CTA, 5
*SET, AREA, 10
*SET, Fn, 1000
*SET, L1, 2*L*COS(CTA)
*SET, H1, L*SIN(CTA)
```

## 5. 定义单元类型及实常数

### 1) 定义单元类型

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete, 弹出“Element Types”拾取对话框。单击“Add...”按钮, 弹出“Library of Element Types”对话框, 在“Library of Element Types”选项的左列表框中选择“Structural→Link”选项, 右列表框中选择“2D spar 1”选项, 在“Element type reference number”选项的输入栏中输入“1”(默认), 单击“OK”按钮。然后单击“Element Types”拾取对话框中的“Close”按钮。

对应命令流:

```
ET, 1, LINK1
```

2) 定义实常数

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Real Constants→Add/Edit/Delete, 弹出 “Real Constants” 拾取对话框, 单击 “Add...” 按钮, 弹出 “Element Type for Real Constants” 对话框, 单击 “OK” 按钮。弹出 “Real Constant Set Number 1,for LINK1” 对话框, 在 “AREA” 选项的输入栏中输入 “AREA”, 单击 “OK” 按钮。在 “Real Constants” 拾取对话框中单击 “Close” 按钮。

对应命令流:

```
R, 1, AREA
```

6. 定义材料性能参数

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Material Models, 弹出 “Define Material Model Behavior” 对话框。在 “Material Models Available” 选项中依次单击: Structural→Linear→Elastic→Isotropic, 弹出 “Linear Isotropic Properties for Material Number 1” 对话框, 在 “EX” 选项的输入栏中输入 “2.1e5”, 单击 “OK” 按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
MP, EX, 1, 2.1e5
```

7. 生成节点和单元

1) 创建节点

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Nodes→In Active CS, 弹出 “Create Nodes in Active Coordinate System” 对话框。在 “NODE Node number” 选项的输入栏中输入 “1”, 单击 “Apply” 按钮; 再次弹出 “Create Nodes in Active Coordinate System” 对话框。在 “NODE Node number” 选项的输入栏中输入 “2”, 在 “X,Y,Z Location in active CS” 选项的输入栏中分别输入 “0.5\*L1”, “H1”, “0”, 单击 “Apply” 按钮; 再次弹出 “Create Nodes in Active Coordinate System” 对话框。在 “NODE Node number” 选项的输入栏中输入 “3”, 在 “X,Y,Z Location in active CS” 选项的输入栏中分别输入 “L1”, “0”, “0”, 单击 “OK” 按钮。

对应命令流:

N, 1	!生成节点 1 (0, 0)
N, 2, 0.5*L1, H1	!生成节点 2 (0.5*L1, H1)
N, 3, L1	!生成节点 3 (L1, 0)

2) 打开节点编号和单元编号显示控制

依次单击: Utility Menu→PlotCtrls→Numbering, 弹出 “Plot Numbering Controls” 对话框, 勾选 “NODE Node numbers” 选项的复选框, 设置为 “On”, 在 “Elem/Attrib numbering” 选项的下拉列表中选择 “Element numbers”, 单击 “OK” 按钮。

对应命令流:

```
/PNUM, NODE, 1
/PNUM, ELEM, 1
```

### 3) 创建单元

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Auto Numbered→Thru Nodes, 弹出“Elements from Nodes”拾取对话框, 在图形窗口拾取节点 1 和节点 2, 单击“Apply”按钮, 再拾取节点 2 和节点 3, 单击“OK”按钮。

对应命令流:

```
E, 1, 2
E, 2, 3
```

## 8. 加载求解

### 1) 定义求解类型

依次单击: Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis, 弹出“New Analysis”对话框, 选择分析类型为“Static”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
ANTYPE, STATIC
```

### 2) 求解控制器设置

依次单击: Main Menu→Solution→Analysis Type→Sol'n Controls, 弹出“Solution Controls”对话框, 在“Basic”选项卡中“Analysis Options”选项的下拉列表中选择“Large Displacement Static”, 在“Automatic time stepping”选项的下拉列表中选择“On”, 在“Number of substeps”选项的输入栏中输入“100”, 在“Frequency”选项的下拉列表中选择“Write every substep”。然后打开“Advance NL”选项卡, 勾选“Arc-length options”选项组中“Activate arc-length method”选项。单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

NLGEOM, ON	!打开大变形选项
AUTOTS, ON	!打开自动时间步长
NSUBST, 100	!指定载荷步数: 最大子步数和最小子步数
OUTRES, ALL, ALL	!将每一步求解结果写入结果文件
ARCLEN, ON	!激活弧长法

### 3) 施加位移全约束

依次单击: Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes, 弹出“Apply U,ROT on Nodes”拾取对话框, 在图形窗口中用鼠标点取节点 1 和节点 3, 单击“OK”按钮, 弹出“Apply U,ROT on Nodes”对话框, 在“Lab2 DOFs to be constrained”选项的下拉列表中选择“All DOF”, 单击“OK”按钮。

对应命令流:

```
D, 1, ALL
```

D, 3, ALL

#### 4) 施加集中载荷

依次单击: Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Force/Moment→On Nodes, 弹出“Apply F/M on Nodes”拾取对话框, 在图形窗口中拾取节点 2, 单击“OK”按钮, 弹出“Apply F/M on Nodes”对话框, 在“Lab Direction of force/mom”选项的下拉列表中选择“FY”, 在“VALUE Force/moment value”选项的输入栏中输入“-Fn”, 单击“OK”按钮。

对应命令流:

F, 2, FY, -Fn

#### 5) 求解

依次单击: Main Menu→Solution→Solve→Current LS, 弹出“/STATUS Command”文本框及“Solve Current Load Step”对话框, 浏览完毕文本框后单击其右上角关闭按钮。单击“Solve Current Load Step”对话框上的“OK”按钮, ANSYS 开始求解计算, 求解完成后, 弹出“Note”对话框, 单击“Close”按钮。

对应命令流:

SOLVE

### 9. 进入一般后处理, 查看结果

#### 1) 读入最后一步结果

依次单击: Main Menu→General Postproc→Read Results→Last Set。

对应命令流:

SET, LAST

#### 2) 设置形状缩放因子

依次单击: Utility Menu→PlotCtrls→Style→Size and Shape, 弹出“Size and Shape”对话框, 在“SCALE Real constant multiplier”选项的输入栏中输入“1”, 单击“OK”按钮。

对应命令流:

/ESHAPE, 1

#### 3) 查看变形图

依次单击: Main Menu→General Postproc→Plot Results→Deformed Shape, 弹出“Plot Deformed Shape”对话框, 在“KUND Items to be plotted”选项的下拉列表中选择“Def + undeformed”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。显示结构变形图, 保留未变形结构轮廓, 如图 6-17 所示。

对应命令流:

PLDISP, 1

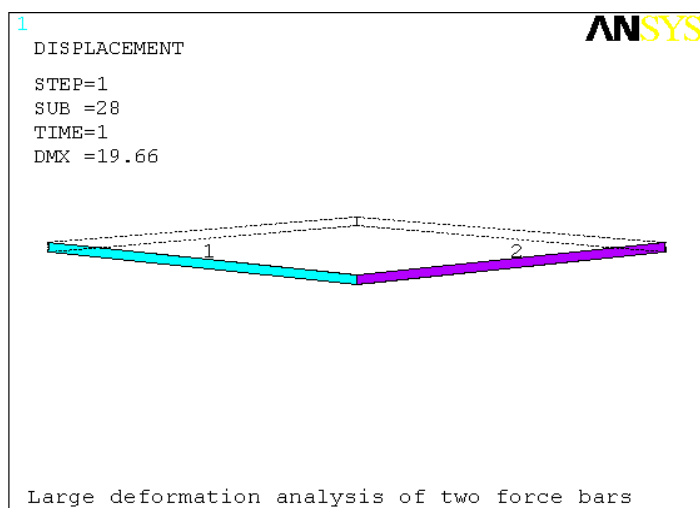


图 6-17 图形显示结构变形

#### 4) 查看节点反力

依次单击：Main Menu→General Postproc→List Result→Reaction Solu，弹出“List Reaction Solution”对话框，在“Lab Item to be listed”选项的下拉列表中选择“All items”，单击“OK”按钮。弹出“PRRSOL Command”文本框，如图 6-18 所示，显示结构节点反力计算结果。

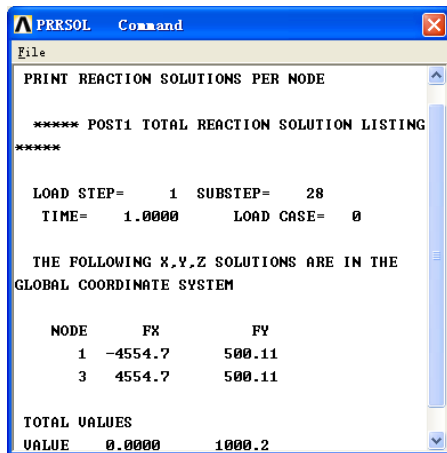



图 6-18 “PRRSOL Command”文本框

对应命令流：

```
PRRSOL
```

## 10. 进入时间历程后处理，查看结果

### 1) 定义节点 2 UY 时间历程

在“Time History Variables”对话框中，单击工具栏中  按钮，弹出“Add Time- History



Variables”对话框，在“Item to be contoured”选项下依次单击：Nodal Solution→DOF Solution→Y-Component of displacement，单击“OK”按钮。弹出“Node for Data”拾取对话框，点选节点2，单击“OK”按钮。

对应命令流：

```
NSOL, 2, 2, U, Y, UY_2
```


2) 对节点2UY时间历程取绝对值

在“Calculator”选项的等号左边输入“UY\_3”，等号右边输入“abs(nsol(1,U,Y))”，单击“Enter”按钮。

对应命令流：

```
ABS, 3, 2
```

3) 定义节点1FY时间历程

在“Time History Variables”对话框中，单击工具栏中按钮，弹出“Add Time-History Variables”对话框，在“Item to be contoured”选项下依次单击：Reaction Forces→Structural Forces→Y-Component of force，单击“OK”按钮。弹出“Node for Data”拾取对话框，点选节点1，单击“OK”按钮。

对应命令流：

```
RFORCE, 4, 1, F, Y, FY_4
```

4) 设置曲线坐标和网格


依次单击：Utility Menu→PlotCtrls→Style→Graphs→Modify Axe，弹出“Axes Modifications for Graph Plots”对话框，在“[/AXLAB] X-axis label”选项的输入栏中输入“UY”，在“[/AXLAB] Y-axis label”选项的输入栏中输入“FY”，单击“OK”按钮。

依次单击：Utility Menu→PlotCtrls→Style→Graphs→Modify Grid，弹出“Grid Modifications for Graph Plots”对话框，勾选“[/GROPT], CGRID Display grid”选项的复选框，单击“OK”按钮。

对应命令流：

```
/AXLAB, X, UY  
/AXLAB, Y, FY  
/GRID, 1
```

5) 查看力位移曲线

在“Time History Variables”对话框中，勾选“Name: 3”选项组中“X-Axis”选项，然后单击“Name: FY\_4”所在的行，单击工具栏中按钮，显示力位移曲线图如图6-19所示。

对应命令流：

```
XVAR, 3  
PLVAR, 4
```

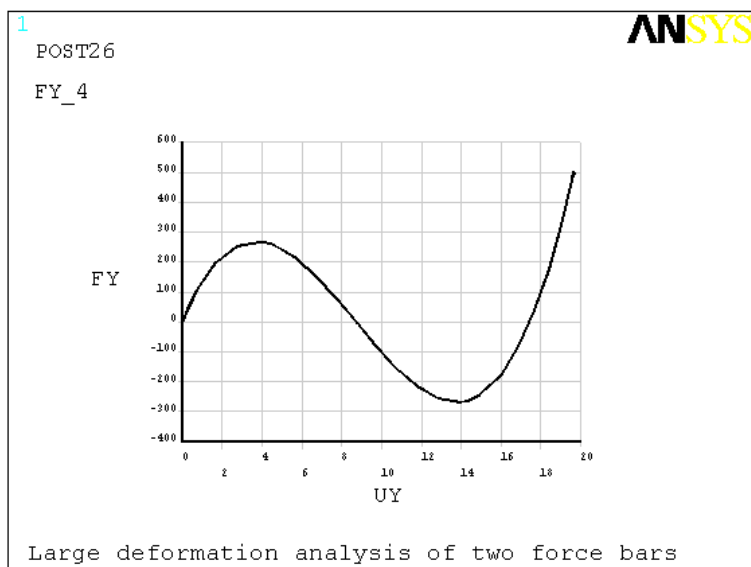


图 6-19 图形显示力位移曲线

## 11. 二力杆件的大变形分析完整命令流

FINISH	!退出以前模块
/CLEAR, START	!清除系统中所有数据,读入启动文件设置
! (1) 建立工作文件名和工作标题	
/FILENAME, EX6-2	!指定当前工程的文件名
/TITLE, Large Deformation Analysis Of Two Force Bars	!定义标题
/PREP7	!进入前处理模块
! (2) 定义参数变量	
*AFUN, DEG	!采用角度来度量
*SET, L, 100	!定义参数
*SET, CTA, 5	!定义参数
*SET, AREA, 10	!定义参数
*SET, Fn, 1000	!定义参数
*SET, L1, 2*L*COS(CTA)	!定义参数
*SET, H1, L*SIN(CTA)	!定义参数
! (3) 定义单元类型及实常数	
ET, 1, LINK1	!定义单元类型
R, 1, AREA	!设置实常数
! (4) 定义材料性能参数	
MP, EX, 1, 2.1e5	!定义材料弹性模量
! (5) 生成节点和单元	
N, 1	!生成节点 1
N, 2, 0.5*L1, H1	!生成节点 2
N, 3, L1	!生成节点 3
/PNUM, NODE, 1	!显示节点编号

/PNUM, ELEM, 1	!显示单元编号
E, 1, 2	!通过节点 1 和节点 2 生成单元 1
E, 2, 3	!通过节点 2 和节点 3 生成单元 2
FINISH	!退出求解模块
! (6) 加载求解 (/SOL)	
/SOL	!进入求解模块
ANTYPE, STATIC	!设置分析类型为静力分析
NLGEOM, ON	!打开大变形选项
AUTOTS, ON	!打开自动时间步长
NSUBST, 100	!指定载荷步数: 最大子步数和最小子步数
OUTRES, ALL, ALL	!将每一步求解结果写入结果文件
ARCLen, ON	!激活弧长法
D, 1, ALL	!对节点 1 施加所有方向的位移约束
D, 3, ALL	!对节点 3 施加所有方向的位移约束
F, 2, FY, -Fn	!对节点 2 施加法向压力 Fn
SOLVE	!发出求解命令
FINISH	!退出求解模块
! (7) 进入一般后处理, 查看结果	
/POST1	!进入一般后处理模块
SET, LAST	!读入最后一步结果
/ESHAPE, 1	!设置形状缩放因子
PLDISP, 1	!显示结构变形图, 保留未变形结构轮廓
PRRSOL	!显示结构节点反力计算结果
FINISH	!退出一般后处理模块
! (8) 进入时间历程后处理, 查看结果	
/POST26	!进入时间历程后处理模块
NSOL, 2, 2, U, Y, UY_2	!定义节点 2Y 向位移的序号为 2, 名为 UY_2
ABS, 3, 2	!将序号 2 中的数值取绝对值, 定义序号 3
RFORCE, 4, 1, F, Y, FY_4	!定义节点 1Y 向反力的序号为 4, 名为 FY_4
/AXLAB, X, UY	!定义横坐标名称为 UY
/AXLAB, Y, FY	!定义纵坐标名称为 FY
!/GRID, 1	!显示绘图网格线
XVAR, 3	!绘制以序号 3 和序号 4 作为 x 轴 y 轴的曲线
PLVAR, 4	
FINISH	!退出时间历程后处理模块

## 6.4 材料非线性分析

非线性的应力-应变关系是结构非线性的常见原因, 许多因素可以影响材料的应力-应变性质, 包括加载历史、环境状况, 以及加载的时间总量。针对材料非线性应力-应变本构关系进行的分析就是材料非线性分析。

## 6.4.1 材料非线性概述

一些材料参数可以使结构刚度在分析期间发生改变。塑性材料、非线性弹性材料、超弹性材料，以及混凝土材料的结构刚度在不同载荷水平下（以及在不同温度下）会因为材料的非线性而不同。

ANSYS 程序提供了多种塑性材料选项，在此主要介绍以下几种典型的材料选项。

### 1. 经典双线性随动强化 (BKIN)

经典双线性随动强化模型使用两条线段来表示应力-应变关系，所以有两个斜率，分别代表弹性模量和切线模量，由于随动强化的 Von Mises 屈服准则，包含有鲍辛格效应，所以此选项适用于遵守 Von Mises 屈服准则，初始条件为各向同性材料的小应变问题，对大多数的金属适用。

需要输入的常数是屈服应力  $\sigma_y$  和切线模量  $E_T$ ，可以定义 6 条不同温度下的曲线。

**注意：**弹性模量可以是与温度相关的；切线模量  $E_T$  不可以是负数，也不能大于弹性模量。

### 2. 双线性等向强化 (BISO)

双线性等向强化模型使用双线性来表示应力-应变曲线，并使用等向强化的 Von Mises 屈服准则。这个选项一般用于初始条件各向同性材料的大应变问题，需要输入的常数与 BKIN 选项相同。

### 3. 多线性随动强化 (MKIN)

多线性随动强化模型使用多条线段来表示应力-应变曲线，模拟随动强化效应，该选项对小应变分析是适用的。需要的输入包括应力-应变数据点（最多 5 个），可以定义 5 条不同温度下的曲线。

### 4. 多线性等向强化 (MISO)

多线性等向强化模型使用多线性来表示使用 Von Mises 屈服准则的等向强化的应力-应变曲线，它适用于比例加载的情况和大应变分析。

需要输入最多 100 个应力-应变曲线，最多可以定义 20 条不同温度下的曲线。

其材料特性的定义步骤如下：

- (1) 定义弹性模量；
- (2) 定义 MISO 数据表；
- (3) 为输入的应力-应变数据指定温度值；
- (4) 输入应力-应变数据；
- (5) 画出材料的应力-应变曲线。

与 MKIN 数据表不同的是, MISO 的数据表对不同的温度可以有不同的应变值。因此, 每条温度曲线有它自己的输入表。

## 6.4.2 实例分析: 均质圆棒基于双线性本构模型下的应力-应变响应

### 1. 问题描述

这是一个均质圆棒受轴向力作用的问题, 三维模型如图 6-20 所示。模型的尺寸如图 6-20 所示, 加载条件为受轴向力  $F$  的作用。材料的参数: 弹性模量  $E=30\text{Mpa}$ ; 泊松比  $\nu=0.3$ 。载荷  $F=100\text{N}$ 。

### 2. 问题分析

根据对称性, 该问题可以简化为二维轴对称模型来进行分析, 简化后的模型如图 6-21 所示, 边界条件为右端固定, 左端施加轴向力。采用 PLANE82 单元进行划分网格求解。

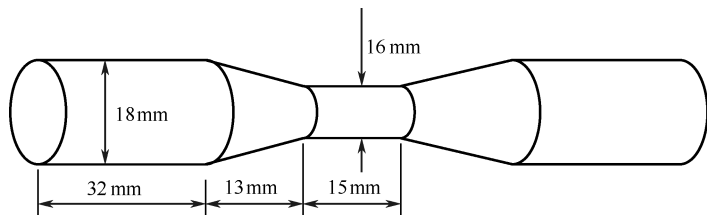


图 6-20 均质圆棒三维模型图

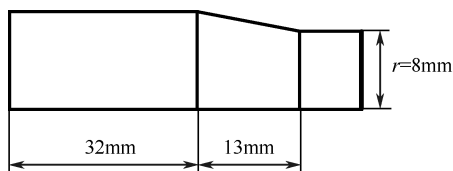


图 6-21 简化为二维轴对称模型图

### 3. 建立工作文件名和工作标题

#### 1) 定义工作文件名

依次单击: Utility Menu→File→Change Jobname, 弹出“Change Jobname”对话框。在“[/FILNAM] Enter new jobname”选项的输入栏中输入工作文件名“EX6-3”, 勾选“New log and error files”选项的复选框, 设置为“Yes”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
/FILNAME, EX6-3
```

## 2) 定义工作标题

依次单击: Utility Menu→File→Change Title, 弹出“Change Title”对话框, 在“[/TITLE] Enter new title”选项的输入栏中输入“The Analysis Of Rod Based On Bilinear”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
/TITLE, The Analysis Of Rod Based On Bilinear
```

## 4. 定义参数变量

依次单击: Utility Menu→Parameters→Scalar Parameters, 弹出“Scalar Parameters”对话框, 在“Selection”选项的输入栏中输入“E =7e4”, 单击“Accept”按钮, 用同样的方法生成其余参数变量, 各参数变量参见表 6-2。完成后单击“Close”按钮。

表 6-2 参数变量及其对应值

参数变量	$E$	$\nu$	SY	EG
对应值	7e4	0.3	402	2e4

对应命令流:

```
E=7e4
v=0.3
SY=402
EG=2e4
```

## 5. 定义单元类型

### 1) 定义单元类型

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete, 弹出“Element Types”拾取对话框, 单击“Add...”按钮, 弹出“Library of Element Types”对话框, 在“Library of Element Types”选项的左列表框中选择“Structural→Solid”选项, 右列表框中选择“Quad 8node 82”选项, 在“Element Type reference number”选项的输入栏中输入“1”, 单击“OK”按钮。

对应命令流:

```
ET, 1, PLANE82
```

### 2) 选择轴对称类型

单击“Element Types”拾取对话框中“Options”按钮, 弹出“PLANE82 element type options”对话框, 在“K3”选项的下拉列表中选择“Axisymmetric”, 单击“OK”按钮。

对应命令流:

```
KEYOPT, 1, 3, 1
```

6. 定义材料性能参数

1) 定义材料

依次单击：Main Menu→Preprocessor→Material Models，弹出“Define Material Model Behavior”对话框。在“Material Models Available”选项中依次单击：Structural→Linear→Elastic→Isotropic，弹出“Linear Isotropic Properties for Material Number 1”对话框，在“EX”选项的输入栏中输入“E”，在“PRXY”选项的输入栏中输入“V”，单击“OK”按钮。

2) 添加塑性本构

在“Material Models Available”选项中依次单击：Structural→Nonlinear→Inelastic→Rate Independent→Isotropic Hardening Plasticity→Mises Plasticity→Bilinear，弹出“Bilinear Isotropic Hardening for Material Number 1”对话框，在“Yield Strss”选项的输入栏中输入“SY”，在“PRXY”选项的输入栏中输入“EG”，单击“OK”按钮。

3) 退出材料设置

在“Define Material Model Behavior”对话框中选择“Material→Exit”（或者直接单击右上角的关闭按钮），关闭该对话框，退出材料属性设置。

对应命令流：

```
MP, EX, 1, E
MP, PRXY, 1, V
TB, BISO, 1
TBDATA, 1, SY, EG
```

7. 建立几何模型、划分网格

1) 创建关键点

依次单击：Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→In Active CS，弹出“Create Keypoints In Active Coordinate System”对话框，在“NPT Keypoint number”选项的输入栏中输入“1”，在“X,Y,Z Location in active CS”选项的输入栏中分别输入“0”，“0”，“0”。单击“Apply”按钮，关键点 1 将出现在 ANSYS 图形窗口中。用同样的方法生成其余关键点，各关键点坐标参见表 6-3。

表 6-3 关键点及坐标

关键点编号	1	2	3	4	5	6	7	8
X 坐标	0	8	8	0	0	9	9	0
Y 坐标	0	0	15	15	28	28	60	60

对应命令流：

```
K, 1, , ,
K, 2, 8, ,
K, 3, 8, 15,
K, 4, , 15,
```

```
K, 5, , 28,
K, 6, 9, 28,
K, 7, 9, 60,
K, 8, , 60,
```

### 2) 由关键点生成面

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Arbitrary→Through KPs, 弹出“Create Area thru KPs”拾取对话框, 在其输入栏中输入“1, 2, 3, 4”, 单击“Apply”按钮; 再次弹出“Create Area thru KPs”拾取对话框, 在其输入栏中输入“3, 4, 5, 6”, 单击“Apply”按钮; 再次弹出“Create Area thru KPs”拾取对话框, 在其输入栏中输入“5, 6, 7, 8”单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
A, 1, 2, 3, 4
A, 3, 4, 5, 6
A, 5, 6, 7, 8
```

### 3) 预设网格种子

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Meshing→MeshTool, 弹出“MeshTool”对话框。单击 Size Controls→Lines 选项后的“Set”按钮, 弹出“Elem Size at Picked Areas”拾取对话框, 在其输入栏中输入“9,6,3,1”, 单击“Apply”按钮, 弹出“Element Size at picked lines”对话框, 在“NDIV No.of element divisions”选项的输入栏中输入“5”。单击“Apply”按钮关闭该对话框。

继续重复上一步操作, 对其他线段进行网格设置, 参见表 6-4, 设置好后单击“OK”按钮。

表 6-4 线段网格种子设置

线段编号	9,6,3,1	2,4,10,8	5,7
NDIV No. of element divisions	5	10	8

对应命令流:

```
!模型网格划分
LESIZE, 9, , , 5
LESIZE, 6, , , 5
LESIZE, 3, , , 5
LESIZE, 1, , , 5
LESIZE, 2, , , 10
LESIZE, 4, , , 10
LESIZE, 10, , , 10
LESIZE, 8, , , 10
LESIZE, 5, , , 8
LESIZE, 7, , , 8
```

### 4) 网格划分

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Meshing→MeshTool, 弹出“MeshTool”对话框。



单击“Mesh”按钮，弹出“Mesh Areas”拾取对话框，选择“Pick All”按钮。

对应命令流：

```
TYPE, 1
MAT, 1
MSHKEY, 1
MSHAPE, 0, 2D
AMESH, ALL
```

## 8. 加载求解

### 1) 求解控制器设置

依次单击：Main Menu→Solution→Analysis Type→Sol'n Controls，弹出“Solution Controls”对话框，在“Basic”选项卡的“Analysis Options”选项的下拉列表中选择“Large Displacement Static”，在“Frequency”选项的下拉列表中选择“Write every substep”。单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流：

```
NLGEOM, ON
OUTRES, ALL, ALL
```

### 2) 施加位移 $X$ 约束

依次单击：Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Lines，弹出“Apply U,ROT on Lines”拾取对话框，在其输入栏中输入“4,5,10”，单击“OK”按钮，弹出“Apply U, ROT on Lines”对话框，在“Lab2 DOFs to be constrained”选项的下拉列表中选择“UX”，单击“OK”按钮。

对应命令流：

```
DL, 4, ,UX
DL, 5, ,UX
DL, 10, ,UX
```

### 3) 施加位移全约束

依次单击：Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Lines，弹出“Apply U,ROT on Lines”拾取对话框，在其输入栏中输入“1”，单击“OK”按钮，弹出“Apply U, ROT on Lines”对话框，在“Lab2 DOFs to be constrained”选项的下拉列表中选择“UY”，单击“OK”按钮。

对应命令流：

```
DL, 1, ,UY
```

### 4) 施加均布载荷

依次单击：Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Pressure→On Lines，弹出“Apply PRES on Lines”拾取对话框，在其输入栏中输入“9”，单击“OK”按钮关闭该对话框，弹出“Apply PRES on lines”对话框，在“VALUE Load PRES value”选项

的输入栏中输入“-500”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流：

```
SFL, 9, PRES, -500
```

### 5) 求解

依次单击：Main Menu→Solution→Solve→Current LS，弹出“/STATUS Command”文本框及“Solve Current Load Step”对话框，浏览完毕文本框后，单击其右上角关闭按钮。单击“Solve Current Load Step”对话框上的“OK”按钮，ANSYS 开始求解计算，求解完成后，弹出“Note”对话框，单击“Close”按钮。

对应命令流：

```
SOLVE
```

## 9. 进入一般后处理，查看结果

依次单击：Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu，弹出“Contour Nodal Solution Data”对话框，在“Item to be contoured”选项下依次单击：Nodal Solution→Stress→von Mises stress，单击“OK”按钮关闭该对话框。显示等效应力云图，如图 6-22 所示。

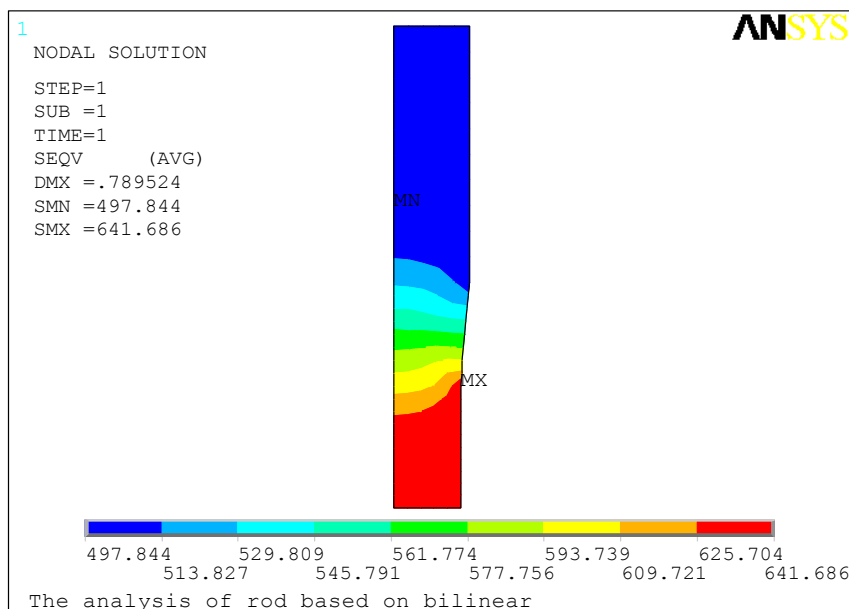


图 6-22 图形显示等效应力云图

对应命令流：

```
PLNSOL, S, EQV
```

通过改变“Contour Nodal Solution Data”对话框，还可以查看以下内容。

(1) von Mises 等效弹性应变：Nodal Solution→Elastic Strain→von Mises elastic strain。

(2) von Mises 等效塑性应变: Nodal Solution→Plastic Strain→von Mises plastic strain。  
在此不再一一列举。

## 10. 均质圆棒基于双线性本构模型下的应力-应变响应分析完整命令流

```

FINISH                                !退出以前模块
/CLEAR, START                         !清除系统中所有数据，读取启动文件设置
! (1) 建立工作文件名和工作标题
/FILNAME, EX6-3                       !指定当前工程的文件名
/TITLE, The Analysis Of Rod Based On Bilinear !定义标题
!进入前处理
/PREP7
! (2) 定义参数变量
E=7e4                                 !弹性模量
v=0.3                                 !泊松比
SY=402                                !屈服强度
EG=2e4                                 !切线模量
! (3) 定义单元类型
ET, 1, PLANE82                         !定义单元类型
KEYOPT, 1, 3, 1                       !轴对称问题
! (4) 定义材料性能参数
MP, EX, 1, E                           !设置弹性模量
MP, PRXY, 1, V                         !设置泊松比
TB, BISO, 1                             !双线性各向同性强化准则（适用于大变形）
TBDATA, 1, SY, EG                     !设置双线性模型的切线模量
! (5) 建立几何模型、划分网格
K, 1, , ,                               !创建关键点
K, 2, 8, ,
K, 3, 8, 15,
K, 4, , 15,
K, 5, , 28,
K, 6, 9, 28,
K, 7, 9, 60,
K, 8, , 60,
A, 1, 2, 3, 4                           !由关键点生成面
A, 3, 4, 5, 6
A, 5, 6, 7, 8
LESIZE, 9, , , 5                       !预设网格种子
LESIZE, 6, , , 5
LESIZE, 3, , , 5
LESIZE, 1, , , 5
LESIZE, 2, , , 10
LESIZE, 4, , , 10
LESIZE, 10, , , 10

```

```

LESIZE, 8, , , 10
LESIZE, 5, , , 8
LESIZE, 7, , , 8
TYPE, 1
MAT, 1
MSHKEY, 1
MSHAPE, 0, 2D
AMESH, ALL                                !网格划分
! (6) 加载求解
/SOLU
NLGEOM, ON                                !大变形开关
OUTRES, ALL, ALL                           !输出所有
DL, 4, , UX                                !X 方向位移约束
DL, 5, , UX                                !X 方向位移约束
DL, 10, , UX                               !X 方向位移约束
DL, 1, , UY                                !Y 方向位移约束
SFL, 9, PRES, -500                         !施加均布压力
ALLSEL                                     !全部选择
SOLVE                                      !进行求解
FINISH
! (7) 进入一般后处理, 查看结果
/POST1
PLNSOL, S, EQV                             !von mises 等效应力云图
PLNSOL, EPEL, EQV                          !von mises 等效弹性应变云图
PLNSOL, EPPL, EQV                          !von mises 等效塑性应变云图
PLNSOL, EPTO, EQV                          !von mises 等效总应变云图

```

### 6.4.3 实例分析：基于 Chaboche 循环本构模型下的应力响应

#### 1. 问题描述

棘轮效应是金属材料在承受非对称的应力加载时普遍存在的现象，在实际工程机构中，结构构件通常会承受一种非对称的循环载荷作用。因此，为了更好地评价工程结构的寿命，安全性及可靠性，必须对材料在循环载荷作用下的响应有一个清楚的认识。本节实例中采用描述棘轮行为的 Chaboche 模型对 6.4.2 节的问题进行重新模拟。

#### 2. 问题分析

由于采用的均质圆棒与 6.4.2 节几何模型相同，故几何建模部分是相同的，可省略。需要改变的是用 Chaboche 模型来替代双线性模型，以及用循环加载来代替简单静力加载。

### 3. 建立工作文件名和工作标题

#### 1) 定义工作文件名

依次单击: Utility Menu→File→Change Jobname, 弹出“Change Jobname”对话框。在“[/FILNAM] Enter new jobname”选项的输入栏中输入工作文件名“EX6-4”, 勾选“New log and error files”选项的复选框, 设置为“Yes”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
/FILNAME, EX6-4
```

#### 2) 定义工作标题

依次单击: Utility Menu→File→Change Title, 弹出“Change Title”对话框, 在“[/TITLE] Enter new title”选项的输入栏中输入“The Analysis Of Rod Based On Chaboche”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
/TITLE, The Analysis Of Rod Based On Chaboche
```

### 4. 定义单元类型

与均质圆棒基于双线性本构模型下的应力-应变响应分析中定义单元类型相同。

### 5. 定义材料性能参数

#### 1) 定义材料

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Material Models, 弹出“Define Material Model Behavior”对话框。在“Material Models Available”选项中依次单击: Structural→Linear→Elastic→Isotropic, 弹出“Linear Isotropic Properties for Material Number 1”对话框, 在“EX”选项的输入栏中输入“7e4”, 在“PRXY”选项的输入栏中输入“0.3”, 单击“OK”按钮。

#### 2) 添加 Chaboche 参数

在“Material Models Available”选项中依次单击: Structural→Nonlinear→Inelastic→Rate Independent→Kinematic Hardening Plasticity→Mises Plasticity→Chaboche, 弹出“Chaboche Kinematic Hardening for Material Number 1”对话框, 在“ $C_1 \sim C_7$ ”选项的输入栏中分别输入“206”、“8e4”、“1000”、“3e5”、“2e5”、“1600”、“400”, 单击“OK”按钮。

**注意:** 行数不够时通过单击“Add Row”按钮来增加  $C_i$ 。

#### 3) 退出材料设置

在“Define Material Model Behavior”对话框中选择“Material→Exit”(或者直接单击右上角关闭按钮), 关闭该对话框, 退出材料属性设置。

对应命令流:

```
MP, EX, 1, 7e4  
MP, PRXY, 1, 0.3
```

```
TB, CHABOCHE, 1, , 3
TBDATA, 1, 206, 8e4, 1000, 3e5, 2e5, 1600
TBDATA, 7, 400
```

## 6. 建立几何模型、划分网格

与均质圆棒基于双线性本构模型下的应力-应变响应分析中几何模型、划分网格相同。

## 7. 加载求解

### 1) 求解控制器设置

依次单击: Main Menu→Solution→Analysis Type→Sol'n Controls, 弹出“Solution Controls”对话框, 在“Basic”选项卡的“Analysis Options”选项的下拉列表中选择“Large Displacement Static”, 在“Frequency”选项的下拉列表中选择“Write every substep”。单击“Nonlinear”选项卡, 在“Nonlinear Options→Line search”选项的下拉列表中选择“On”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
PRED, ON
OUTRES, ALL, ALL
NLGEOM, ON
```

### 2) 施加位移 $X$ 约束

依次单击: Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Lines, 弹出“Apply U,ROT on Lines”拾取对话框, 在其输入栏中输入“4,5,10”, 单击“OK”按钮, 弹出“Apply U, ROT on Lines”对话框, 在“Lab2 DOFs to be constrained”选项的下拉列表中选择“UX”, 单击“OK”按钮。

对应命令流:

```
DL, 4, ,UX
DL, 5, ,UX
DL, 10, ,UX
```

### 3) 施加位移全约束

依次单击: Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Lines, 弹出“Apply U,ROT on Lines”拾取对话框, 在其输入栏中输入“1”, 单击“OK”按钮, 弹出“Apply U, ROT on Lines”对话框, 在“Lab2 DOFs to be constrained”选项的下拉列表中选择“UY”, 单击“OK”按钮。

对应命令流:

```
DL, 1, ,UY
```

### 4) 施加循环载荷

命令流施加循环载荷, 一个周期的载荷示意图如图 6-23 所示。

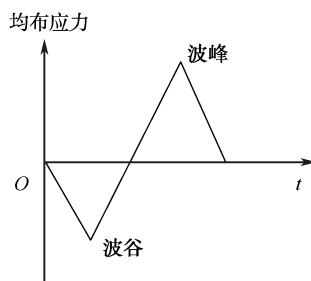


图 6-23 一个周期的载荷示意图

对应命令流:

```

PEAK=-250                                !设置峰值
VALLEY=200                               !设置谷值
NUM=10                                    !定义循环数
*DO, I, 1, NUM, 1                         !建立循环加载
TIME, 5                                   !为载荷步设置时间
NSUBST, 5                                !指定载荷步中所需要的子步数
SFL, 9, PRES, PEAK                       !施加均布压力
ALLSEL
LSWRITE                                  !写入载荷步文件
NSUBST, 5                                !指定载荷步中所需要的子步数
TIME, 10                                  !为载荷步设置时间
SFL, 9, PRES, 0                           !施加均布压力
ALLSEL
LSWRITE                                  !写入载荷步文件
NSUBST, 5                                !指定载荷步中所需要的子步数
TIME, 12.5                                !为载荷步设置时间
SFL, 9, PRES, VALLEY                     !施加均布压力
ALLSEL
LSWRITE                                  !写入载荷步文件
NSUBST, 5                                !指定载荷步中所需要的子步数
TIME, 15                                  !为载荷步设置时间
SFL, 9, PRES, 0                           !施加均布压力
ALLSEL
LSWRITE                                  !写入载荷步文件
*ENDDO
ALLSEL

```

#### 5) 求解

依次单击: Main Menu→Solution→Solve→From LS Files, 弹出“Solve Load Step Files”对话框, 在“LSMIN”选项的输入栏中输入“1”, 在“LSMAX”选项的输入栏中输入“NUM\*4”, 在“LSINC”选项的输入栏中输入“1”。单击“OK”按钮, ANSYS 开始求解计算。

对应命令流:

LSSOLVE, 1, NUM\*4

## 8. 进入一般后处理，查看结果

依次单击：Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu，弹出“Contour Nodal Solution Data”对话框，在“Item to be contoured”选项下依次单击：Nodal Solution→Plastic Strain→Y-component of plastic strain，单击“OK”按钮关闭该对话框。显示Y方向等效塑性应变云图，如图6-24所示。

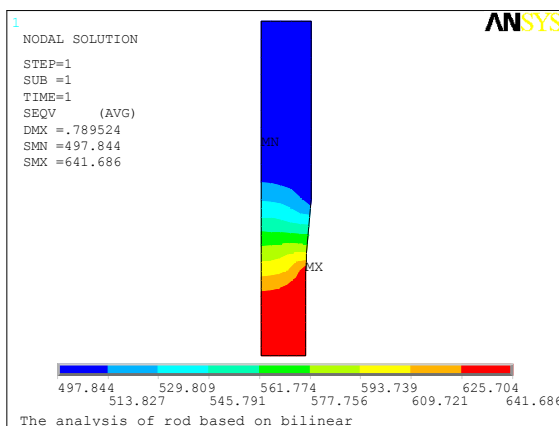



图 6-24 Y 方向等效塑性应变云图

对应命令流：

```
SET, 1, LAST, 1
PLNSOL, EPPL, Y
FINISH
```

## 9. 进入时间历程后处理，查看结果

### 1) 定义节点 12 UY 时间历程

(1) 定义Y方向应力。在“Time History Variables”对话框中，单击工具栏中按钮，弹出“Add Time-History Variables”对话框，在“Item to be contoured”选项中依次单击：Nodal Solution→Stress→Y-Component of stress，弹出“Add Time-History Variable”对话框，在“Variable Name”选项的输入栏输入“STRESSY”，单击“OK”按钮。弹出“Node for Data”拾取对话框，在其输入栏中输入节点 12，单击“Apply”按钮。

(2) 定义Y方向弹性应变。在“Add Time-History Variables”对话框中，在“Item to be contoured”选项中依次单击：Nodal Solution→Elastic Strain→Y-Component of elastic strain，弹出“Add Time-History Variable”对话框，在“Variable Name”选项的输入栏输入“STRAINYE”，单击“OK”按钮。弹出“Node for Data”拾取对话框，在其输入栏中输入节点 12，单击“Apply”按钮。

(3) 定义Y方向塑性应变。在“Add Time-History Variables”对话框中，依次单击：Nodal Solution→Plastic Strain→Y-Component of plastic strain，弹出“Add Time-History



Variable”在“Variable Name”选项的输入栏中输入“STRAINYP”，单击“OK”按钮。弹出“Node for Data”拾取对话框，在其输入栏中输入节点 12，单击“OK”按钮。

对应命令流：

```
ANSOL, 2, 12, S, Y, STRESSY
ANSOL, 3, 12, EPEL, Y, STRAINYE
ANSOL, 4, 12, EPPL, Y, STRAINYP
```

## 2) 设置曲线坐标和网格

依次单击：Utility Menu→PlotCtrls→Style→Graphs→Modify Axe，弹出“Axes Modifications for Graph Plots”对话框，在“[/AXLAB] X-axis label”选项的输入栏中输入“STRAIN [MM/MM]”，在“[/AXLAB] Y-axis label”选项的输入栏中输入“STRESS[MPA]”，单击“OK”按钮。

对应命令流：

```
/COLOR, CURVE, BLUE, 1          !定义曲线颜色
/AXLAB, X, STRAIN[MM/MM]
/AXLAB, Y, STRESS[MPA]
```


## 3) 弹塑性应变累加

在“Time History Variables”对话框中“Calculator”选项的等号左边输入“8”，等号右边输入“ansol(12,EPEL,Y)+ ansol(12,EPPL,Y)”，单击“Enter”按钮。

对应命令流：

```
ADD, 8, 3, 4, , , , 1, 1, 1,
```

## 4) 查看应力-应变曲线

在“Time History Variables”对话框的中，勾选“Name: 8”选项组中“X-Axis”选项，然后单击“Name:STRESSY”所在的行，再单击工具栏中按钮，显示应力控制下的应力-应变曲线如图 6-25 所示。

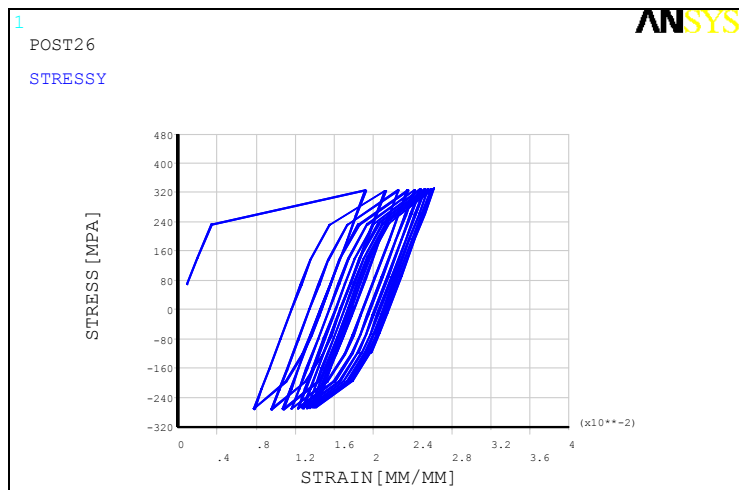


图 6-25 应力控制下的应力-应变曲线

对应命令流:

```
XVAR, 8
PLVAR, 2
```

## 10. 基于 Chaboche 循环本构模型下的应力响应分析完整命令流（应力控制）

```
FINISH                                !退出以前模块
/CLEAR, START                         !清除系统中所有数据，读入启动文件设置
! (1) 建立工作文件名和工作标题
/FILNAME, EX6-4                       !指定当前工程的文件名
/TITLE, The Analysis Of Rod Based On Chaboche !定义标题
! (2) 定义单元类型
/PREP7
ET, 1, PLANE82                        !选择 PLANE82 单元
KEYOPT, 1, 3, 1                      !轴对称问题
! (3) 定义材料性能参数
MP, EX, 1, 7e4                       !弹性模量
MP, PRXY, 1, 0.3                     !泊松比
TB, CHABOCHE, 1, , 3                 !Chaboche 循环本构模型参数输入
TBDATA, 1, 206, 8e4, 1000, 3e5, 2e5, 1600
TBDATA, 7, 400
! (4) 建立几何模型、划分网格
K, 1, , ,                             !创建关键点
K, 2, 8, ,
K, 3, 8, 15,
K, 4, , 15,
K, 5, , 28,
K, 6, 9, 28,
K, 7, 9, 60,
K, 8, , 60,
A, 1, 2, 3, 4                         !由关键点生成面
A, 3, 4, 5, 6
A, 5, 6, 7, 8
LESIZE, 9, , , 5                     !预设网格种子
LESIZE, 6, , , 5
LESIZE, 3, , , 5
LESIZE, 1, , , 5
LESIZE, 2, , , 10
LESIZE, 4, , , 10
LESIZE, 10, , , 10
LESIZE, 8, , , 10
LESIZE, 5, , , 8
LESIZE, 7, , , 8
```

```

TYPE, 1
MAT, 1
MSHKEY, 1
MSHAPE, 0, 2D
AMESH, ALL !网格划分
! (5) 加载求解
/SOLU
PRED, ON !打开线性预测
OUTRES, ALL, ALL !输出所有
NLGEOM, ON !打开大变形开关
!施加边界条件
DL, 4, ,UX !X 方向位移约束
DL, 5, ,UX !X 方向位移约束
DL, 10, ,UX !X 方向位移约束
DL, 1, ,UY !Y 方向位移约束
ALLSEL
PEAK=-250 !设置峰值
VALLEY=200 !设置谷值
NUM=10 !定义循环数
*DO, I, 1, NUM, 1 !建立循环加载
TIME, 5 !为载荷步设置时间
NSUBST, 5 !指定载荷步中所需要的子步数
SFL, 9, PRES, PEAK !施加均布压力
ALLSEL
LSWRITE !写入载荷步文件
NSUBST, 5 !指定载荷步中所需要的子步数
TIME, 10 !为载荷步设置时间
SFL, 9, PRES, 0 !施加均布压力
ALLSEL
LSWRITE !写入载荷步文件
NSUBST, 5 !指定载荷步中所需要的子步数
TIME, 12.5 !为载荷步设置时间
SFL, 9, PRES, VALLEY !施加均布压力
ALLSEL
LSWRITE !写入载荷步文件
NSUBST, 5 !指定载荷步中所需要的子步数
TIME, 15 !为载荷步设置时间
SFL, 9, PRES, 0 !施加均布压力
ALLSEL
LSWRITE !写入载荷步文件
*ENDDO
ALLSEL
LSSOLVE, 1, NUM*4 !求解
FINISH

```

! (6) 进入一般后处理, 查看结果

/POST1

SET, 1, LAST, 1

PLNSOL, EPPL, Y

FINISH

!提出最后一步结果

!绘制 Y 方向等效塑性应变云图

! (7) 时间历程后处理, 查看结果

/POST26

ANSOL, 2, 12, S, Y, STRESSY

!提取节点 12 的 Y 方向应力

ANSOL, 3, 12, EPEL, Y, STRAINYE

!提取节点 12 的 Y 方向弹性应变

ANSOL, 4, 12, EPPL, Y, STRAINYP

!提取节点 12 的 Y 方向塑性应变

/COLOR, CURVE, BLUE, 1

!定义曲线颜色

/AXLAB, X, STRAIN[MM/MM]

!定义 X 坐标名称

/AXLAB, Y, STRESS[MPA]

!定义 Y 坐标名称

ADD, 8, 3, 4, , , , 1, 1, 1,

!将弹性应变和塑性应变相加

XVAR, 8

!总的应变作为 X 轴

PLVAR, 2

!绘制 Y 方向应力-应变曲线

下面给出的是应变控制下的 Chaboche 循环本构模型下应力-应变响应分析完整命令流, 若读者感兴趣, 可以亲自通过 GUI 操作路径的方法实现, 其中绝大部分和应力控制下的分析步骤是相同的, 仅仅是加载方式改变了一下。实现后可输出应变控制下的应力-应变曲线如图 6-26 所示。

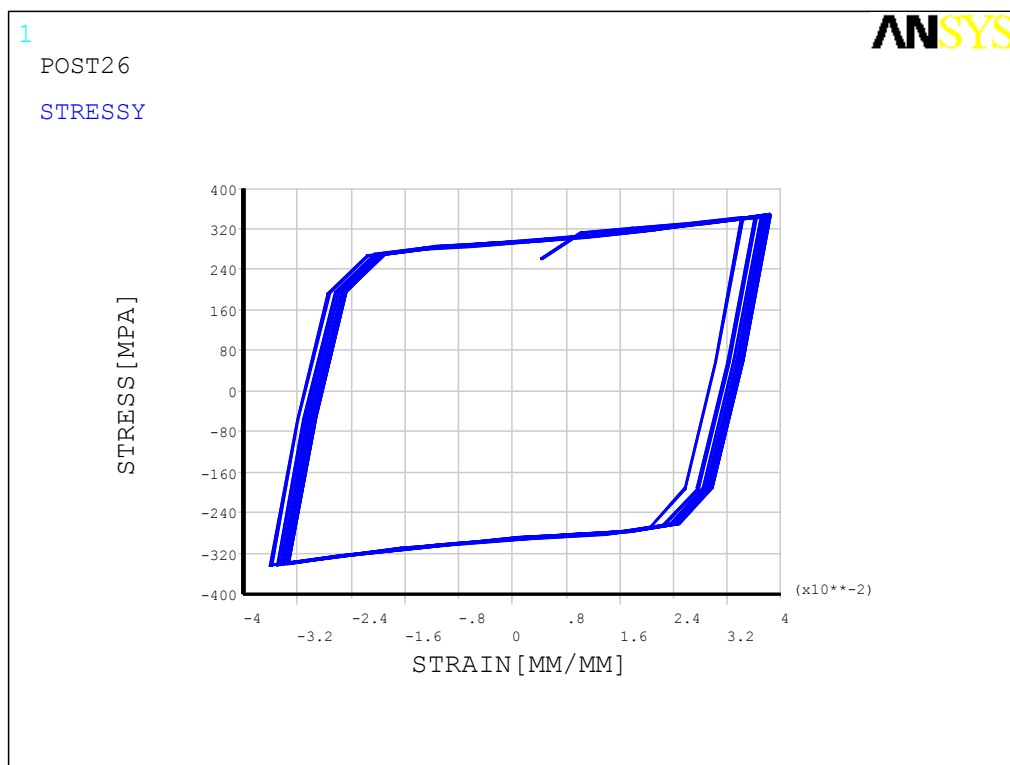


图 6-26 应变控制下的应力-应变曲线

## 11. 基于 Chaboche 循环本构模型下的应变响应分析完整命令流（应变控制）

FINISH	!退出以前模块
/CLEAR, START	!清除系统中所有数据,读入启动文件设置
! (1) 建立工作文件名和工作标题	
/FILENAME, EX6-4	!指定当前工程的文件名
/TITLE, The Analysis Of Rod Based On Chaboche	!定义标题
! (2) 定义单元类型	
/PREP7	
ET, 1, PLANE82	!选择 PLANE82 单元
KEYOPT, 1, 3, 1	!轴对称问题
! (3) 定义材料性能参数	
MP, EX, 1, 7e4	!弹性模量
MP, PRXY, 1, 0.3	!泊松比
TB, CHABOCHE, 1, , 3	!Chaboche 循环本构模型参数输入
TBDATA, 1, 206, 8e4, 1000, 3e5, 2e5, 1600	
TBDATA, 7, 400	
! (4) 建立几何模型、划分网格	
K, 1, , ,	!创建关键点
K, 2, 8, ,	
K, 3, 8, 15,	
K, 4, , 15,	
K, 5, , 28,	
K, 6, 9, 28,	
K, 7, 9, 60,	
K, 8, , 60,	
A, 1, 2, 3, 4	!由关键点生成面
A, 3, 4, 5, 6	
A, 5, 6, 7, 8	
LESIZE, 9, , , 5	!预设网格种子
LESIZE, 6, , , 5	
LESIZE, 3, , , 5	
LESIZE, 1, , , 5	
LESIZE, 2, , , 10	
LESIZE, 4, , , 10	
LESIZE, 10, , , 10	
LESIZE, 8, , , 10	
LESIZE, 5, , , 8	
LESIZE, 7, , , 8	
TYPE, 1	
MAT, 1	
MSHKEY, 1	
MSHAPE, 0, 2D	

```

AMESH, ALL                                !网格划分
!(5) 加载求解
/SOLU
PRED, ON                                  !打开线性预测
OUTRES, ALL, ALL                          !输出所有
NLGEOM, ON                                !打开大变形开关
!施加边界条件
DL, 4, , UX                               !X 方向位移约束
DL, 5, , UX                               !X 方向位移约束
DL, 10, , UX                              !X 方向位移约束
DL, 1, , UY                               !Y 方向位移约束
ALLSEL
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!以下部分与应力控制不同!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
DIS=1                                     !设置应变变量
NUM=10                                    !定义循环周次
!建立循环加载
*DO, I, 1, NUM, 1                         !建立循环加载
    TIME, 5                               !为载荷步设置时间
    NSUBST, 5                             !指定载荷步中所需要的子步数
    DL, 9, , UY, DIS                      !施加位移约束
    ALLSEL
    LSWRITE                               !写入载荷步文件
    NSUBST, 5                             !指定载荷步中所需要的子步数
    TIME, 10                              !为载荷步设置时间
    DL, 9, , UY, 0                        !施加位移约束
    ALLSEL
    LSWRITE                               !写入载荷步文件
    NSUBST, 5                             !指定载荷步中所需要的子步数
    TIME, 12.5                            !为载荷步设置时间
    DL, 9, , UY, -DIS                    !施加位移约束
    ALLSEL
    LSWRITE                               !写入载荷步文件
    NSUBST, 5                             !指定载荷步中所需要的子步数
    TIME, 15                              !为载荷步设置时间
    DL, 9, , UY, 0                      !施加位移约束
    ALLSEL
    LSWRITE                               !写入载荷步文件
*ENDDO
ALLSEL
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!以上部分与应力控制不同!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

LSSOLVE, 1, NUM*4                         !求解
FINISH

```

! (6) 进入一般后处理, 查看结果

/POST1

SET, 1, LAST, 1

!提出最后一步结果

PLNSOL, EPPL, Y

!绘制 Y 方向等效塑性应变云图

FINISH

! (7) 时间历程后处理, 查看结果

/POST26

ANSOL, 2, 12, S, Y, STRESSY

!提取节点 12 的 Y 方向应力

ANSOL, 3, 12, EPEL, Y, STRAINYE

!提取节点 12 的 Y 方向弹性应变

ANSOL, 4, 12, EPPL, Y, STRAINYP

!提取节点 12 的 Y 方向塑性应变

/COLOR, CURVE, BLUE, 1

!定义曲线颜色

/AXLAB, X, STRAIN[MM/MM]

!定义 X 坐标名称

/AXLAB, Y, STRESS[MPA]

!定义 Y 方向坐标名称

ADD, 8, 3, 4, , , , 1, 1, 1,

!将弹性应变和塑性应变相加

XVAR, 8

!总的应变作为 X 轴

PLVAR, 2

!绘制 Y 方向应力-应变曲线

## 6.5 状态非线性分析（接触分析）

状态非线性分析一种与状态相关的非线性行为, 接触是一种典型的状态非线性行为。本文所提到的状态非线性分析通常是指接触问题分析。

### 6.5.1 接触分析概述

接触问题是一类高度非线性行为, 需要耗费大量的计算资源, 为了进行有效的计算, 如何理解好问题的特性和建立合理的模型是非常重要的。

接触问题存在以下两个较大的难点:

(1) 在求解之前并不知道接触区域, 并且表面之间是接触或分开也是未知的, 它会随载荷、材料、边界条件和其他因素而定;

(2) 大多的接触问题是需要计算摩擦的。ANSYS 中提供了几种摩擦模型, 它们都是非线性的, 摩擦使问题的收敛性变得困难。

#### 1. 接触分析的分类

##### 1) 按照材料属性的不同分类

在 ANSYS 软件中, 按照不同材料属性的接触体, 接触问题可分为刚体-柔体 (刚-柔) 的接触和柔体-柔体 (柔-柔) 的接触两类。

(1) 在刚-柔的接触问题中, 接触面的一个或多个被当做刚体 (比跟它接触的变形体有大得多的刚度)。一般来说, 一种软材料和一种硬材料接触时, 问题可以被假设为刚-柔接触, 许多金属成形问题归为此类接触。

(2) 柔-柔接触，是一种更普遍的类型，在这种情况下，两个接触体都是变形体（有相近的刚度）。

## 2) 按照接触形态的不同分类

根据接触形态的不同，接触问题可分为点-点接触（点-点）、点-面接触（点-面）和面接触（面-面）3种。每种接触方式使用的接触单元都有特定的适用范围，ANSYS 接触分析功能参见表 6-5。

表 6-5 ANSYS 接触分析功能

	点-点			点-面	面-面	
接触单元编号	12	52	178	175	171、172	173、174
目标单元编号				169、170	169	170
2D	是		是	是	是	
3D		是	是	是		是
滑动	小	小	小	大	大	大
圆柱间隙	是		是			
纯拉格朗日乘法			是			
增广拉格朗日乘法			是	是	是	是
内部多点约束（MPC）				是	是	是
接触刚度	用户定义	用户定义	半自动	半自动	半自动	半自动
自动网格工具	EINTF	EINTF	EINTF	ESURF	ESURF	ESURF
低阶	是	是	是	是	是	是
高阶				是（仅 2D）	是	是
刚-柔	是	是	是	是	是	是
柔-柔	是	是	是	是	是	是
热接触				是	是	是

## 2. 接触单元

当接触界面是一个面时，可以使用梁、壳或实体单元来模拟，并通过接触单元能自动识别接触时，接触单元覆盖在分析界面的模型上。

### 1) 点-点接触单元

点-点接触单元主要用于模拟点-点的接触行为，为了使用点-点的接触单元，需要预先知道接触位置，这类接触问题只能适用于接触面之间有较小相对滑动的情况。

当两个面上的节点一一对应时，相对滑动可以忽略不计，两个面挠度（转动）保持小量，那么可以用点-点的接触单元来模拟面-面的接触问题，如过盈装配问题就是一个典型例子。

### 2) 点-面接触单元

点-面接触单元主要用于给点-面的接触行为建模，如两根梁的相互接触。



如果通过一组节点来定义接触面，生成多个单元，那么可以通过点-面的接触单元来模拟面-面的接触问题，面既可以是刚性体也可以是柔性体，这类接触问题的典型例子就是插头插到插座里。

与点-点接触单元不同的是，不需要预先知道确切的接触位置，接触面之间也不需要保持一致的网格，并且允许有大的变形和大的相对滑动。

### 3) 面-面接触单元

ANSYS 提供刚-柔和柔-柔的面-面接触单元，刚性面被当做“目标”面时，分别用 Targe169 和 Targe170 来模拟 2D 和 3D 的“目标”面。柔性体的表面被当做“接触”面时，用 Conta171、Conta172、Conta173 和 Conta174 来模拟。目标面和接触面构成一个“接触对”，为了生成一个“接触对”，目标单元和接触单元要具有相同的实常编号。

与点-点接触单元相比，面-面接触单元具有以下优点：

- (1) 支持高阶和低阶单元。
- (2) 支持有大滑动和摩擦的大变形。
- (3) 对工程应用提供更好的接触结果，如法向压力和摩擦应力。
- (4) 对于目标面的形状没有限制。

当用于刚性目标面时，这些单元利用圆、抛物线、球体、锥体和圆柱体来模拟直线或曲面，任何复杂的曲面都可以通过 ANSYS 的前处理器来建模。同时，面-面接触单元仅支持静态、瞬态分析、失稳、谐分析和模态分析等。

### 3. 接触分析的步骤

执行一个典型的面-面接触分析的基本步骤如下：

- (1) 建立模型并划分网格；
- (2) 识别接触类型；
- (3) 定义刚性目标面；
- (4) 定义柔性接触面；
- (5) 设置单元关键字和实常数；
- (6) 定义/控制刚性目标面的运动；
- (7) 给定必须的边界条件；
- (8) 定义求解选项和载荷步；
- (9) 求解接触问题；
- (10) 查看结果。

## 6.5.2 实例分析：钢球/PMMA 平面试样的径向微动接触分析

微动 (Fretting) 是指在名义静止的接触表面发生的由机械振动、疲劳载荷、电磁振动或热循环等交变载荷作用下，引起的振幅极小的相对运动 (位移幅值通常在微米量级)。微动会造成接触表面磨损疲劳，引起构件咬合松动或污染源等形成；也可以加速裂纹的萌生和扩展，使零部件的使用寿命大大降低，因此对其研究也越来越多地引起了人们的重视。微动具

有广泛的应用,如在微机电系统微动开关的接触电阻,磁性存储系统中磁头和磁盘的相互作用,汽车、火车的板簧在减震过程中承受的径向交变载荷,核反应堆中的弹性支持机构,各种冲压器械、滚动轴承、齿轮,以及凸轮等。本节利用有限元对钢球/PMMA 平面试样的径向微动接触进行简单分析。

### 1. 问题描述

某径向微动试验装置如图 6-27 所示,其简化示意图如图 6-28 所示,钢球性能参数:弹性模量  $E = 207\text{GPa}$ ,泊松比  $\nu = 0.29$ 。平面性能参数:弹性模量  $E = 3.3\text{GPa}$ ,泊松比  $\nu = 0.3$ ,法向压力为  $F_n = 10\text{N}$ 。

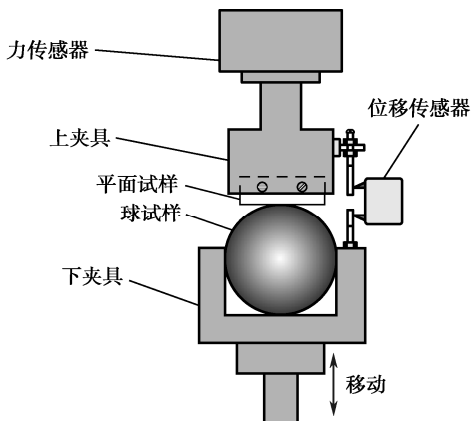


图 6-27 径向微动试验装置图

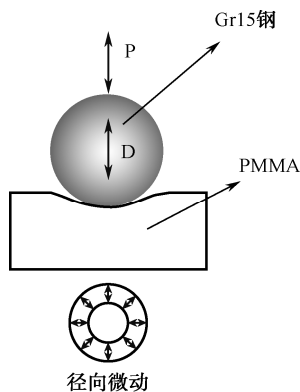


图 6-28 径向微动试验简化示意图

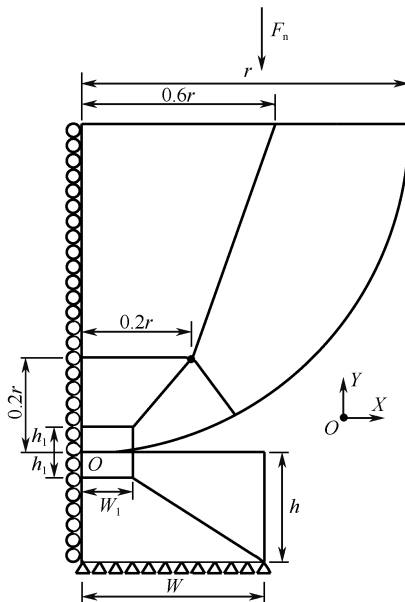


图 6-29 有限元模型示意图

### 2. 问题分析

因为径向接触问题是关于轴中心线对称的,故此问题属于轴对称问题,只需要取一半建立平面轴对称几何模型即可。几何尺寸,约束条件及加载如图 6-29 所示。在  $X = 0$  的边上加  $X$  方向约束,在  $Y = -h$  的边上加全约束。载荷  $F_n$  加在  $Y = r$  的线段上。选择 PLANE42 (2D) 单元,接触非线性并开启大变形进行计算求解。

### 3. 建立工作文件名和工作标题

#### 1) 定义工作文件名

依次单击: Utility Menu→File→Change Jobname, 弹出“Change Jobname”对话框。在“[/FILNAM] Enter new jobname”选项的输入栏中输入工作文件名“EX6-5”,勾选“New log and error files”选项的复选框,设置为“Yes”,然后单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
/FILNAME, EX6-5
```

## 2) 定义工作标题

依次单击: Utility Menu→File→Change Title, 弹出“Change Title”对话框, 在“[/TITLE] Enter new title”选项的输入栏中输入“Radial Fretting of Ball and Flat”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
/TITLE, Radial Fretting of Ball and Flat
```

## 4. 定义单元类型

### 1) 定义单元类型

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete, 弹出“Element Types”拾取对话框, 单击“Add...”按钮, 弹出“Library of Element Types”对话框, 在“Library Element Types”选项的左列表框中选择“Structural→Solid”, 右列表框中选择“Quad 4node 42”, 在“Element Type reference number”选项的输入栏中输入“1”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

### 2) 退出单元设置

单击 Element Types 对话框中的“Close”按钮, 关闭该对话框。

对应命令流:

```
ET, 1, PLANE42
```

## 5. 定义材料性能参数

### 1) 定义钢球材料

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Material Models, 弹出“Define Material Model Behavior”对话框。在“Material Models Available”选项中依次单击: Structural→Linear→Elastic→Isotropic, 弹出“Linear Isotropic Properties for Material Number 1”对话框, 在“EX”选项的输入栏中输入“2.07e11”, 在“PRXY”选项的输入栏中输入“0.3”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
MP, EX, 1, 2.07e11  
MP, NUXY, 1, 0.29
```

### 2) 定义 PMMA 材料

在“Define Material Model Behavior”对话框中, 在标题栏中依次单击: Material→New Model, 弹出“Define Material ID”对话框。在“Define Material ID”选项的输入栏中输入“2”(默认), 单击“OK”按钮关闭该对话框。在“Material Models Defined”选项的左列表框中选择“Material Model Number 2”, 在列表框中选择“Material Models Available”。在

“Material Models Available” 选项中依次单击: Structural→Linear→Elastic→Isotropic, 弹出“Linear Isotropic Properties for Material Number” 对话框, 在“EX” 选项的输入栏中输入“3.3e9”, 在“Prxy” 选项的输入栏中输入“0.3”, 单击“OK” 按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
MP, EX, 2, 3.3e9
MP, NUXY, 2, 0.3
```

### 3) 定义接触摩擦系数

在“Define Material Model Behavior” 对话框中, 在标题栏中依次单击: Material→New Model, 弹出“Define Material ID” 对话框。在“Define Material ID” 选项的输入栏中输入“3” (默认), 单击“OK” 按钮关闭该对话框。在“Material Models Defined” 选项的左列表框中选择“Material Model Number 3”, 右列表框中选择“Material Models Available”。在“Material Models Available” 选项中依次单击: Structural→Friction Coefficient, 弹出“Friction Coefficient for Material Number 3” 对话框, 在“MU” 选项的输入栏中输入“0.3”, 单击“OK” 按钮关闭该对话框。单击“Element Types” 拾取对话框上的“Close” 按钮。

对应命令流:

```
MP, MU, 3, 0.3
```

!定义接触摩擦系数

## 6. 定义参数变量

依次单击: Utility Menu→Parameters→Scalar Parameters, 弹出“Scalar Parameters” 对话框, 在“Selection” 选项的输入栏中输入“r=12.7”, 单击“Accept” 按钮。用同样的方法生成其他参数变量, 各参数变量参见表 6-6, 单击“Close” 按钮关闭该对话框。

**注意:** 参数、命令及关键词不区分大小写。

表 6-6 参数变量及其对应值

参数变量	$r$	$w_1$	$w$	$h$	$h_1$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_5$	$F_n$
对应值	12.7	0.8	4	2	0.4	8	12	8	6	4	10

对应命令流:

```
*SET, r, 12.7
*SET, w1, 0.8
*SET, w, 4
*SET, h, 2
*SET, h1, 0.4
*SET, n1, 8
*SET, n2, 12
*SET, n3, 8
*SET, n4, 6
*SET, n5, 4
*SET, Fn, 10
```

## 7. 建立简化后的球模型及划分网格

### 1) 生成 1/4 圆面

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Circle→Partial Annulus, 弹出“Part Annular Circ Area”对话框, 分别在“WP X”、“WP Y”、“Rad-1”和“Theta-1”选项的输入栏中输入“0”, “r”, “r”, “-90”, 单击“OK”按钮。

对应命令流:

```
CYL4, 0, r, r, -90
```

### 2) 创建关键点

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→In Active CS, 弹出“Create Keypoints In Active Coordinate System”对话框, 在“NPT Keypoint number”选项的输入栏中输入“4”, 在“X,Y,Z Location in active CS”选项的输入栏中分别输入“0”, “h1”, “0”。单击“Apply”按钮, 再次弹出“Create Keypoints In Active Coordinate System”对话框, 在“NPT Keypoint number”选项的输入栏中输入“5”, 在“X,Y,Z Location in active CS”选项的输入栏中分别输入“w1”, “h1”, “0”。单击“Apply”按钮, 再次弹出“Create Keypoints In Active Coordinate System”对话框, 在“NPT Keypoint number”选项的输入栏中输入“6”, 在“X,Y,Z Location in active CS”选项的输入栏中分别输入“w1”, “0”, “0”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
K, 4, 0, h1  
K, 5, w1, h1  
K, 6, w1, 0
```

### 3) 打开关键点编号、线段编号, 以及面编号显示控制

依次单击: Utility Menu→PlotCtrls→Numbering, 弹出“Plot Numbering Controls”对话框, 勾选“KP Keypoint numbers”选项的复选框, 设置为“On”; 勾选“LINE Line numbers”选项的复选框, 设置为“On”; 单击“AREA Area numbers”选项的复选框, 设置为“On”, 单击“OK”按钮。

对应命令流:

```
/PNUM, KP, 1  
/PNUM, LINE, 1  
/PNUM, AREA, 1
```

### 4) 由关键点生成线

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Create→Lines→Lines→In Active CS, 弹出“Lines in Active”拾取对话框。在图形窗口中拾取关键点 4 和关键点 5, 再拾取关键点 5 和关键点 6, 单击“OK”按钮。

对应命令流:

```
L, 4, 5
```

L, 5, 6

#### 5) 合并线段

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Add→Lines, 弹出“Add Lines”拾取对话框。在图形窗口中拾取线段 4 和线段 5, 单击“OK”按钮, 然后再单击拾取对话框中“OK”按钮即可。

**注意:** 对于过程中弹出的警告窗口直接单击“Close”按钮。

对应命令流:

LCOMB, 4, 5, 0

#### 6) 分割面

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Divide→Area by Line, 弹出“Divide Area Line”拾取对话框。在图形窗口中拾取面 1, 单击“OK”按钮, 再拾取线段 4 后单击拾取对话框“OK”按钮即可。

对应命令流:

ASBL, 1, 4

#### 7) 创建关键点

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→In Active CS, 弹出“Create Keypoints In Active Coordinate System”对话框, 在“NPT Keypoint number”选项的输入栏中输入“8”, 在“X,Y,Z Location in active CS”选项的输入栏中分别输入“0.6\*r”, “r”, “0”。单击“Apply”按钮, 再次弹出“Crente Keypoints In Active Coordinate System”对话框, 在“NPT Keypoint number”选项的输入栏中输入“9”, 在“X,Y,Z Location in active CS”选项的输入栏中分别输入“0.2\*r”, “0.2\*r”, “0”。单击“Apply”按钮, 再次弹出“Crente Keypoints In Active Coordinate System”对话框, 在“NPT Keypoint number”选项的输入栏中输入“10”, 在“X,Y,Z Location in active CS”选项的输入栏中分别输入“0”, “0.2\*r”, “0”。单击“Apply”按钮, 再次弹出“Crente Keypoints In Active Coordinate System”对话框, 在“NPT Keypoint number”选项的输入栏中输入“11”, 在“X,Y,Z Location in active CS”选项的输入栏中分别输入“0.2\*r”, “0”, “0”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
K, 8, 0.6*r, r
K, 9, 0.2*r, 0.2*r
K, 10, 0, 0.2*r
K, 11, 0.2*r, 0
```

#### 8) 由关键点生成线

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Create→Lines→Lines→In Active CS, 弹出“Lines in Active”拾取对话框。在图形窗口中拾取关键点 9 和关键点 7, 再拾取关键点 9 和关键点 8, 然后再拾取关键点 9 和关键点 10, 最后拾取关键点 9 和关键点 11, 单击“OK”按钮。

对应命令流:

L, 9, 7

L, 9, 8  
L, 9, 10  
L, 9, 11

#### 9) 合并线段

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Add→Lines, 弹出“Add Lines”拾取对话框。在图形窗口中拾取线段 1 和线段 4, 单击“OK”按钮, 然后再单击拾取对话框中“OK”按钮即可。

对应命令流:

LCOMB, 1, 4, 0

#### 10) 删除线段

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Delete→Line and Below, 弹出“Delete Lines Only”拾取对话框。在图形窗口中拾取线段 1 和线段 4, 单击“OK”按钮, 然后再单击拾取对话框中“OK”按钮即可。

对应命令流:

LDELE, 1, 4, 3

#### 11) 分割面

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Divide→Area by Line, 弹出“Divide Area Line”拾取对话框。首先在图形窗口中拾取面 3, 单击“OK”按钮, 再拾取线段 12, 单击“Apply”按钮; 然后在图形窗口中拾取面 4, 单击“OK”按钮, 再拾取线段 11, 单击“Apply”按钮; 最后在图形窗口中拾取面 5, 单击“OK”按钮, 再拾取线段 3, 单击“Apply”按钮。

对应命令流:

ASBL, 3, 12  
ASBL, 4, 11  
ASBL, 5, 3

#### 12) 黏结面

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Glue→Areas, 弹出“Glue Areas”拾取对话框, 单击“Pick All”按钮。

对应命令流:

AGLUE, ALL

#### 13) 重新压缩编号

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Numbering Ctrls→Merge Items, 弹出“Merge Coincident or Equivalently Defined Items”对话框, 在“Label Type of item to be merge”选项的下拉列表中选择“ALL”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

NUMMRG, ALL

#### 14) 预设网格种子

依次单击：Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Lines→Picked Lines，弹出“Element Size on...”拾取对话框。在图形窗口中拾取线段 3、线段 6、线段 7 和线段 10，单击“OK”按钮，弹出“Element Size at picked areas”对话框，在“NDIV No. of element divisions”选项的输入栏中输入“n1”，在“SPACE Spacing ratio”选项的输入栏中输入“0”，单击“Apply”按钮，即完成了对线段 3、线段 6、线段 7 和线段 10 的网格设置。

对应命令流：

```
LSEL, S, LINE, , 3, 6, 3
LSEL, A, LINE, , 7, 10, 3
LESIZE, ALL, , , n1
```

继续重复这一操作对其他线段进行网格设置，各线段网格种子设置参见表 6-7，设置好后单击“OK”按钮。

表 6-7 线段网格种子设置

线段编号	3, 6, 7, 10	4, 5, 11, 14	1, 8	2	9, 12, 13
NDIV No. of element divisions	n1	n2	n3	n3	n4
SPACE Spacing ratio	0	0	5	0.2	0

对应命令流：

```
LSEL, S, LINE, , 4, 5           !选择线段 4 和线段 5
LSEL, A, LINE, , 11, 14, 3      !选择线段 11 和线段 14
LESIZE, ALL, , , n2
LSEL, S, LINE, , 1, 8, 7       !选择线段 1 和线段 8
LESIZE, ALL, , , n3, 5, , , 1
LSEL, S, LINE, , 2             !选择线段 2
LESIZE, ALL, , , n3, 0.2, , , 1
LSEL, S, LINE, , 9             !选择线段 9
LSEL, A, LINE, , 12, 13        !选择线段 12 和线段 13
LESIZE, ALL, , , n4
```

#### 15) 设置网格划分单元属性

依次单击：Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→Default Attribs，弹出“Meshing Attributes”对话框，在“[MAT] Material number”选项的输入栏中选择“1”，单击“OK”按钮。

对应命令流：

```
TYPE, 1
MAT, 1
```



### 16) 网格划分

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Areas→Mapped→3 or 4sided, 弹出“Mesh Areas”拾取对话框, 单击“Pick All”按钮自动关闭该拾取对话框。

对应命令流:

```
AMESH, ALL
```

## 8. 建立下端的矩形板简化模型及划分网格

### 1) 建立矩形面

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Rectangle→By Dimensions, 弹出“Create Rectangle by Dimensions”对话框, 在“X1,X2 X-coordinates”选项的输入栏中分别输入“0”, “w”, 在“Y1,Y2 Y-coordinates”选项的输入栏中分别输入“0”, “-h”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
RECTNG, 0, w, 0, -h
```

### 2) 创建关键点

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→In Active CS, 弹出“Create Keypoints In Active Coordinate System”对话框, 在“NPT Keypoint number”选项的输入栏中输入“15”, 在“X,Y,Z Location in active CS”选项的输入栏中分别输入“w1”, “0”, “0”。单击“Apply”按钮, 再次弹出“Create Keypoints In Active Coordinate System”对话框, 在“NPT Keypoint number”选项的输入栏中输入“16”, 在“X,Y,Z Location in active CS”选项的输入栏中分别输入“0”, “-h1”, “0”。单击“Apply”按钮, 再次弹出“Create Keypoints In Active Coordinate System”对话框, 在“NPT Keypoint number”选项的输入栏中输入“17”, 在“X,Y,Z Location in active CS”选项的输入栏中分别输入“w1”, “-h1”, “0”。单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

K, 15, w1, 0	!生成关键点 15
K, 16, 0, -h1	!生成关键点 16
K, 17, w1, -h1	!生成关键点 17

### 3) 由关键点生成线

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Create→Lines→Lines→In Active CS, 弹出“Lines in Active”拾取对话框。首先在图形窗口中拾取关键点 17 和关键点 15, 然后拾取关键点 17 和关键点 16, 最后拾取关键点 17 和关键点 12, 单击“OK”按钮。

对应命令流:

L, 17, 15	!通过关键点 17 和关键点 15 生成线段 19
L, 17, 16	!通过关键点 17 和关键点 16 生成线段 20
L, 17, 12	!通过关键点 17 和关键点 12 生成线段 21

#### 4) 分割面

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Divide→Area by Line, 弹出“Divide Area Line”拾取对话框。在图形窗口中拾取面 6, 单击“OK”按钮; 再拾取线段 19、线段 20 和线段 21 后单击“OK”按钮。

对应命令流:

LSEL, S, LINE, , 19, 20, 21	!选择线段 19、线段 20、线段 21
ASBL, 6, ALL	!面 6 被线段 19、线段 20、线段 21 分割
ALLSEL	!选择所有元素

#### 5) 预设网格种子

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Lines→Picked Lines, 弹出“Element Size on...”拾取对话框。在图形窗口中拾取线段 16、线段 19 和线段 25, 单击“OK”按钮, 弹出“Element Size at picked areas”对话框, 在“NDIV No. of element divisions”选项的输入栏中输入“n1”, 在“SPACE Spacing ratio”选项的输入栏中输入“0”, 单击“Apply”按钮, 即完成了对线段 16、线段 19 和线段 25 的网格设置。

对应命令流:

LSEL, S, LINE, , 16, 19, 3	!选择线段 16 和线段 19
LSEL, A, LINE, , 25	!再选择线段 25
LESIZE, ALL, , , n1	!将线段 16、线段 19 和线段 25 划分 n1 份

继续重复这一操作对其他线段进行网格设置, 各线段网格种子设置参见表 6-8, 设置好后单击“OK”按钮。

表 6-8 线段网格种子设置

线段编号	16, 19, 25	15, 20, 24	22, 23	21
种子数目	n1	n2	n3	n3
NDIV No. of element divisions				
网格间隔比例	0	0	0.2	5
SPACE Spacing ratio				

对应命令流:

LSEL, S, LINE, , 15, 20, 5	!选择线段 15 和线段 20
LSEL, A, LINE, , 24	!再选择线段 24
LESIZE, ALL, , , n2	!将线段 15、线段 20 和线段 24 划分 n2 份
LSEL, S, LINE, , 22, 23	!选择线段 22 和线段 23
LESIZE, ALL, , , n3, 0.2, , , 1	!线段 22 和线段 23 以比例 0.2 划分 n3 份
LSEL, S, LINE, , 21	!选择线段 21
LESIZE, ALL, , , n3, 5, , , 1	!线段 21 以比例 5 划分 n3 份

#### 6) 黏结面

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Glue→Areas, 弹出“Glue Areas”拾取对话框, 拾取面 7、面 8 和面 9, 单击“OK”按钮。

对应命令流:

ASEL, S, AREA, , 7, 8, 9	!选择面 7、面 8 和面 9
AGLUE, ALL	

7) 设置网格划分单元属性

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→Default Attribs, 弹出“Meshing Attributes”对话框, 在 “[MAT] Material number” 选项的下拉列表中选择 “2”, 单击 “OK” 按钮。

对应命令流:

TYPE, 1
MAT, 2

8) 网格划分

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Areas→Mapped→3 or 4sided, 弹出 “Mesh Areas” 拾取对话框, 单击 “Pick All” 按钮自动关闭该拾取对话框。

**注意:** 此处 “Pick All” 仅对前面选择面 7、面 8 和面 9 起作用。

对应命令流:

AMESH, ALL	!对所选面进行网格划分
ALLSEL	!选择所有的元素

9) 局部网格细分

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Meshing→Modify Mesh→Refine At→Lines, 弹出 “Refine mesh at lines” 拾取对话框, 拾取线段 4 和线段 24, 单击 “OK” 按钮, 弹出 “Refine Mesh at Line” 对话框, 在 “LEVEL Level of refinement” 选项的下拉列表中选择 “1 (Minimal)”, 勾选 “New log and error files” 选项的复选框, 设置为 “Yes”, 然后单击 “OK” 按钮, 弹出 “Refine mesh at lines advanced options” 对话框, 在 “DEPTH Depth of refinement” 选项的输入栏中输入 “4”, 在 “POST Postprocessing” 选项的下拉列表中选择 “Cleanup+Smooth”, 勾选 “RETAIN Retain Quads” 选项的复选框, 设置为 “Yes”, 单击 “OK” 按钮, 再单击 “Warning” 提示框的 “Close” 按钮来关闭该提示框。


对应命令流:

LREFINE, 4, , 1, 4, 1, 1	!对线段 4 网格进行细分
LREFINE, 24, , 1, 4, 1, 1	!对线段 24 网格进行细分

9. 生成接触对及设置实常数

采用接触向导来完成接触对的自动生成。

1) 打开接触向导

在 ANSYS 用户界面, 单击  按钮, 弹出 “Contact Manager” 对话框, 如图 6-30 所示。

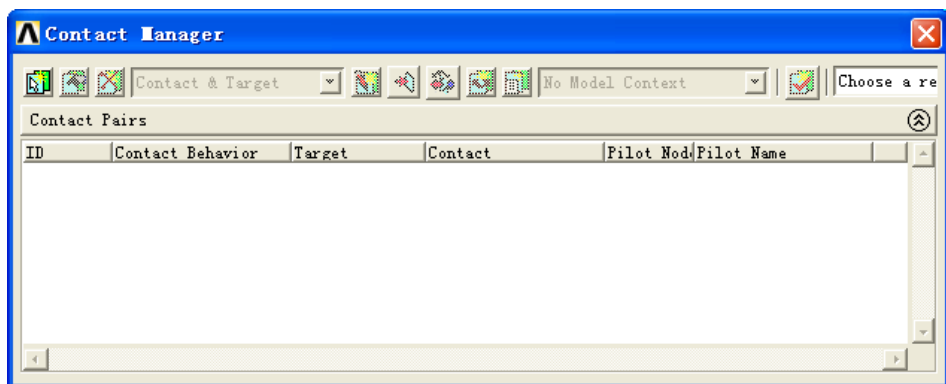



图 6-30 “Contact Manager”对话框

### 2) 设置目标面

单击“Contact Manager”对话框中的按钮，弹出“Contact Wizard”对话框，如图 6-31 所示。单击“Pick Target...”按钮，弹出“Select Lines for...”拾取对话框，在图形窗口中拾取目标面线段 4 和线段 25，单击“OK”按钮，再单击“Nest→”按钮，再次弹出“Contact Wizard”对话框，如图 6-32 所示。

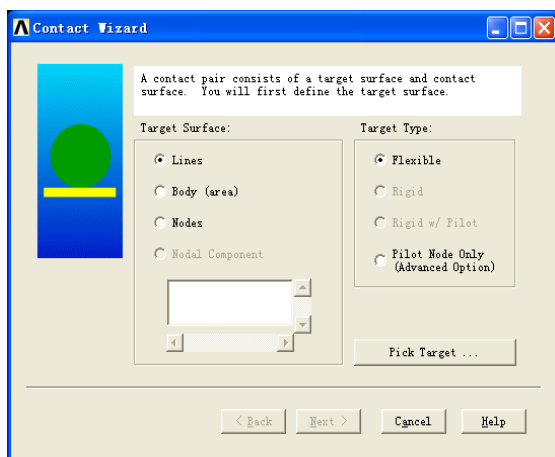


图 6-31 “Contact Wizard”对话框（一）

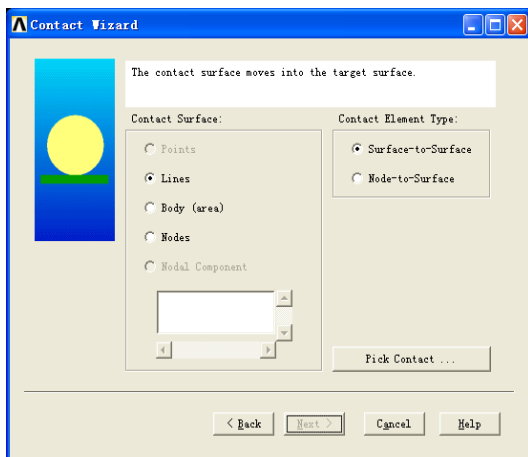


图 6-32 “Contact Wizard”对话框（二）

### 3) 设置接触面

单击“Contact Wizard”对话框中的“Pick Contact...”按钮，弹出“Select Lines for...”拾取对话框，在图形窗口中拾取目标面线段 4 和线段 25，单击“OK”按钮，再次弹出“Contact Wizard”对话框，如图 6-33 所示。单击“Optional settings”按钮，弹出“Contact Properties”对话框，如图 6-34 所示。选择“Basic Friction”选项卡，在“Material ID”选项的下拉列表中选择“3”。单击“OK”按钮，弹出“Contact Wizard”提示框，单击“Finish”按钮完成设置。

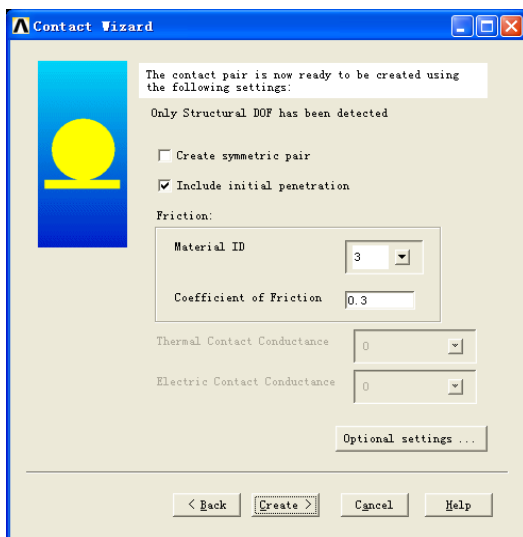


图 6-33 “Contact Wizard”对话框（三）

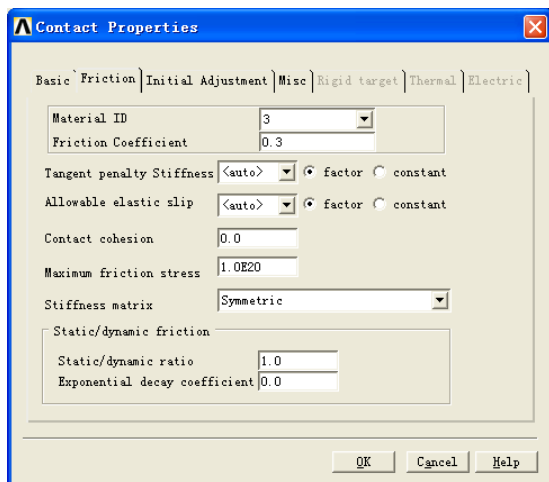


图 6-34 “Contact Properties”对话框

对应命令流:

MAT, 3	!定义单元实常数
R, 3	!定义单元实常数
REAL, 3	!选取单元实常数
ET, 2, TARGE169	!选择目标面接触单元 TARGE169
ET, 3, CONTA171	!选择接触面接触单元 CONTA 171
! Generate the target surface	!选取球上可能接触的圆弧作为目标面
LSEL, S, , 4	!选取圆弧线段 4
LSEL, A, , 8	!再选取圆弧线段 8
NSLL, S, 1	!选择线段 2 和线段 10 上所有节点
ESLN, S, 0	
TYPE, 2	!为将要生成的接触单元指定类型
ESURF, ALL	!对所有选择的节点生成接触单元
ALLSEL	!选择所有的元素
! Generate the contact surface	!选取平板上可能接触的线段作为接触面
LSEL, S, , 24	!选取圆弧线段 24
LSEL, A, , 23	!选取圆弧线段 23
NSLL, S, 1	!选择线段 24 和线段 23 上所有节点
TYPE, 3	!为将要生成的接触单元指定类型
ESURF, ALL	!对所有选择的节点生成接触单元
ALLSEL	!选择所有的元素

#### 4) 定义实常数

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Real Constants→Add/Edit/Delete, 弹出“Real Constants”拾取对话框, 单击“Edit...”按钮, 弹出“Element Type for Real Constants”对话框, 单击“OK”按钮, 弹出“Real Constant Set Number 3, for CONTA171”对话框, 如图 6-35 所示, 设置完成实常数后单击“OK”按钮关闭该对话框。在“Real Constants”拾取对话框

中单击“Close”按钮，退出实常数设置。

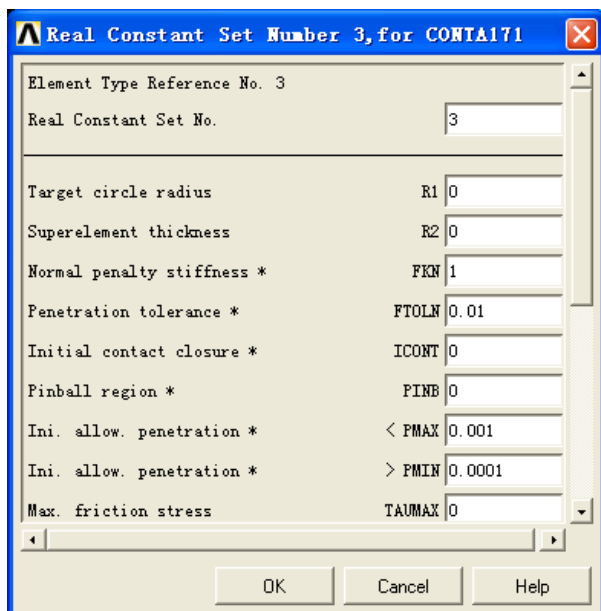


图 6-35 “Real Constant Set Number 3, for CONTA171”对话框

对应命令流:

```
R, 3, 0, 0, 1, 0.01
RMORE, 0.001, 0.0001
```

## 10. 耦合节点位移

### 1) 选择约束节点

依次单击: Utility Menu→Entities..., 弹出“Select Entities”拾取对话框, 如图 6-36 所示, 设置完成后单击“OK”按钮。弹出“Select lines”拾取对话框, 在图形窗口中拾取线段 7 和线段 14, 单击“OK”按钮关闭该拾取对话框。再依次单击: Utility Menu→Entities..., 弹出“Select Entities”对话框, 如图 6-37 所示设置, 单击“OK”按钮。

### 2) 施加耦合约束

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Coupling/Ceqn→Couple DOFs, 弹出“Define Coupled DOFs”拾取对话框, 单击“Pick All”按钮, 弹出“Define Coupled DOFs”对话框, 在“NSET Set reference number”选项的输入栏中输入“1”, 在“Lab Degree-of-freedom label”选项的下拉列表中选择“UY”, 单击“OK”按钮。

对应命令流:

```
LSEL, S, LOC, Y, r
CP, 1, UY, ALL
```

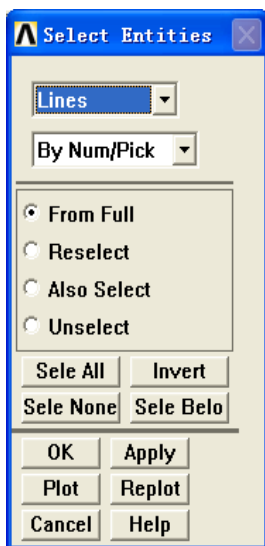


图 6-36 “Select Entities”拾取对话框（一）

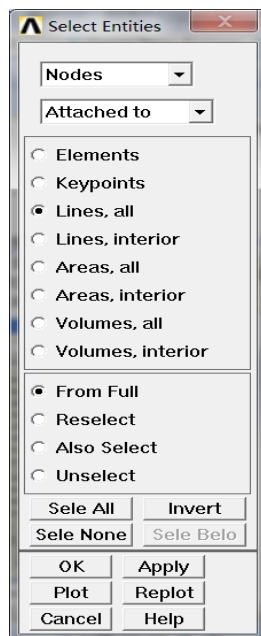


图 6-37 “Select Entities”拾取对话框（二）

### 3) 选择所有元素

依次单击：Utility Menu→Everything。

对应命令流：

```
ALLSEL
```

## 11. 加载求解

### 1) 定义求解类型

依次单击：Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis，弹出“New Analysis”对话框，选择分析类型为“Static”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流：

```
ANTYPE, STATIC
```

### 2) 求解控制器设置

依次单击：Main Menu→Solution→Analysis Type→Sol'n Controls，弹出“Solution Controls”对话框，如图 6-38 所示。对“Basic”选项卡进行设置，然后设置“Nonlinear”选项卡，勾选“Nonlinear Options→Line search”选项的复选框，设置为“On”，在“DOF solution predictor”选项的下拉列表中选择“On after 1 substp”。单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流：

```
NLGEOM, ON
TIME, 1
AUTOTS, ON
NSUBST, 20, 1000, 20
```

OUTRES, ALL, ALL

LNSRCH, ON

!使用线性搜索选项

PRED, ON

!打开时间步长预测器

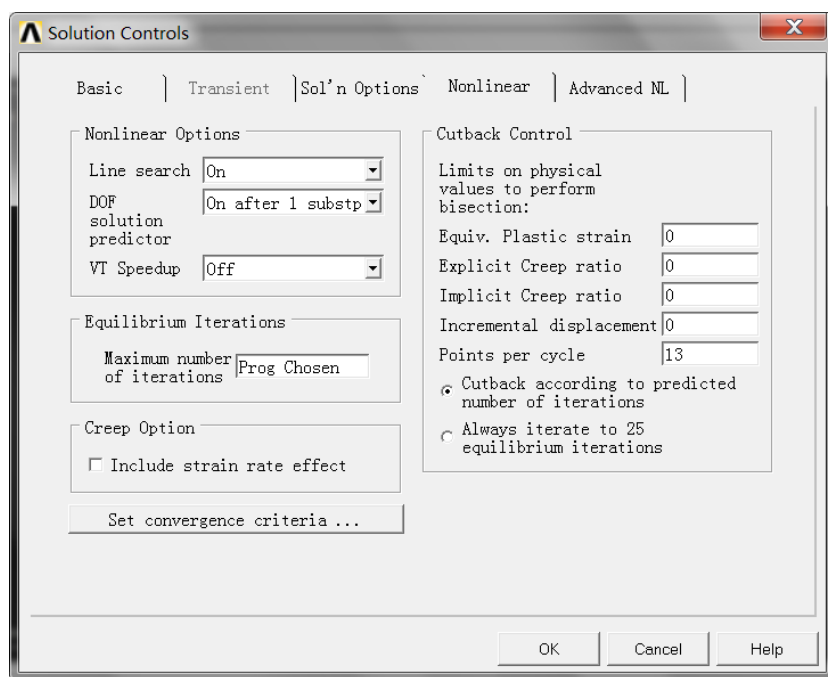


图 6-38 “Solution Controls”对话框

### 3) 施加 $X$ 方向位移约束

依次单击: Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Lines, 弹出“Apply U,ROT on Lines”拾取对话框, 在其输入栏中输入“1, 3, 12, 22, 25”(也可在图形窗口中用鼠标点取 L1, L3, L12, L22, L25), 单击“OK”按钮, 弹出“Apply U,ROT on Lines”对话框, 在“Apply U, ROT on Lines”的下拉列表中选择“UX”, 单击“OK”按钮。

对应命令流:

```
LSEL, S, LOC, X, 0
DL, ALL, , UX
ALLSEL
```

### 4) 施加位移全约束

依次单击: Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Lines, 弹出“Apply U,ROT on Lines”拾取对话框, 在图形窗口中拾取线段 15, 单击“OK”按钮, 弹出“Apply U,ROT on Lines”对话框, 在“Apply U, ROT on Lines”的下拉列表中选择“All DOF”, 单击“OK”按钮。

对应命令流:

```
DL, 15, ,ALL
```



### 5) 施加 Y 方向载荷

依次单击: Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Pressure→On Lines, 弹出“Apply PRES on Lines”拾取对话框, 在图形窗口中拾取线段 7 和线段 14, 单击“OK”按钮, 弹出“Apply PRES on Lines”对话框, 在“VALUE Load PRES value”选项的输入栏中输入“Fn”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
LSEL, S, LINE, , 7, 14, 7
SFL, ALL, PRES, Fn
ALLSEL
```

### 6) 求解

依次单击: Main Menu→Solution→Solve→Current LS, 弹出“/STATUS Command”文本框及“Solve Current Load Step”对话框, 浏览完毕文本框后依次单击: File→Close 退出。单击“Solve Current Load Step”对话框上的“OK”按钮, ANSYS 开始求解计算, 求解完成后, 弹出“Note”对话框, 单击“Close”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
SOLVE
```

## 12. 进入一般后处理, 查看结果

### 1) 显示等效应力云图

依次单击: Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu, 弹出“Contour Nodal Solution Data”对话框, 依次单击: Nodal Solution→Stress→von Mises stress, 然后单击“OK”按钮关闭该对话框。显示结构等效应力云图, 如图 6-39 所示。

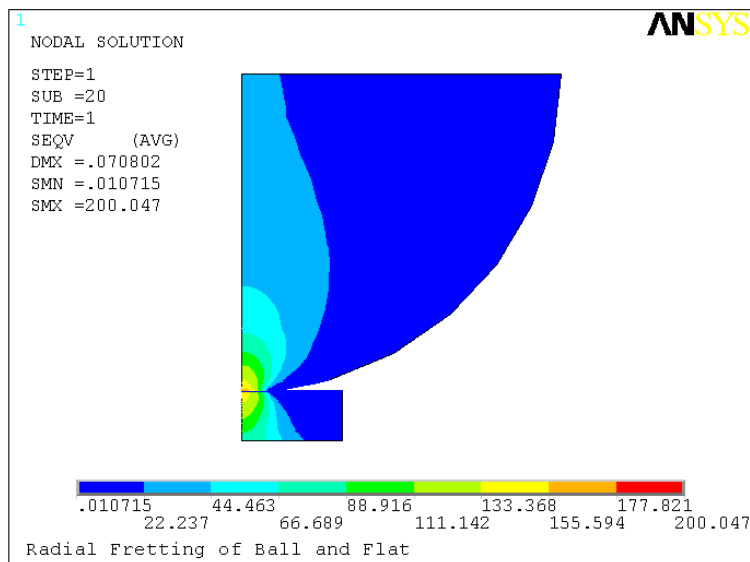


图 6-39 结构等效应力云图

对应命令流:

PLNSOL, S, EQV

## 2) 显示接触状态

依次单击: Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu, 弹出“Contour Nodal Solution Data”对话框, 依次单击: Nodal Solution→Contact→Contact status, 然后单击“OK”按钮关闭该对话框。显示接触状态, 如图 6-40 所示。

对应命令流:

PLNSOL, CONT, STAT, 0, 1.0

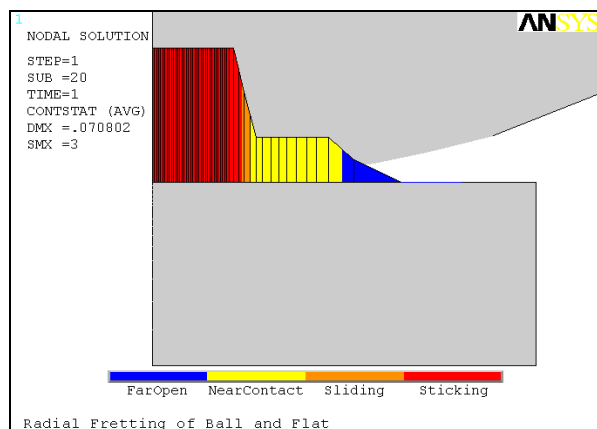


图 6-40 图形显示接触状态示意图

## 3) 显示法向接触应力

依次单击: Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu, 弹出“Contour Nodal Solution Data”对话框, 依次单击: Nodal Solution→Contact→Contact pressure, 然后单击“OK”按钮关闭该对话框。显示结构法向接触应力云图, 如图 6-41 所示。

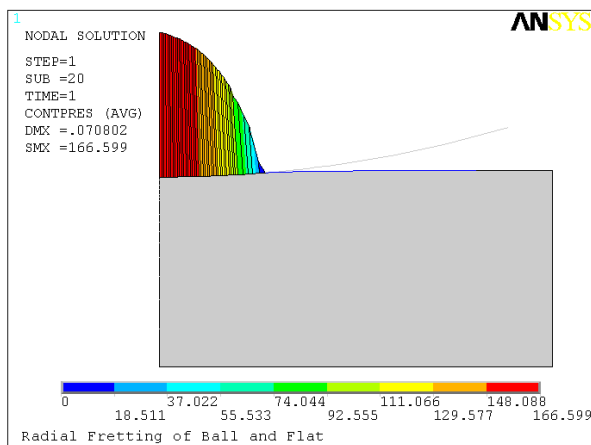


图 6-41 结构法向接触应力云图

对应命令流:

```
PLNSOL, CONT, PRES, 0, 1.0
```

#### 4) 显示接触摩擦切应力

依次单击: Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu, 弹出“Contour Nodal Solution Data”对话框, 依次单击: Nodal Solution→Contact→Contact friction stress, 然后单击“OK”按钮关闭该对话框。显示结构法向接触摩擦切应力云图, 如图 6-42 所示。

对应命令流:

```
PLNSOL, CONT, SFRIC, 0, 1.0
```

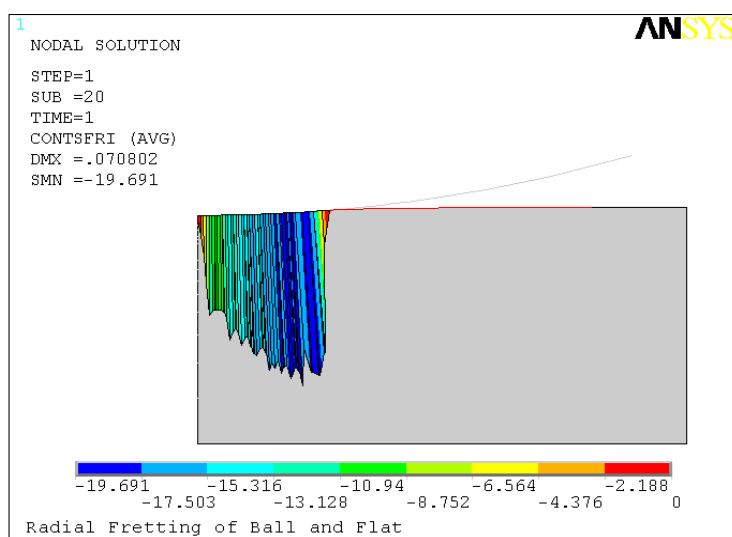


图 6-42 结构法向接触摩擦切应力云图

### 13. 钢球/PMMA 平面试样的径向微动接触分析完整命令流

```
FINISH                                !退出以前模块
/CLE,START                            !清除系统中所有数据, 读取启动文件设置
! (1) 建立工作文件名和工作标题
/FILNAME, EX6-5
/TITLE, Radial Fretting of Ball and Flat !定义标题
! (2) 定义单元类型
/PREP7                                !进入前处理模块
ET, 1, PLANE42                        !选择 PLANE42 (2D) 单元
! (3) 定义材料性能参数
MP, EX, 1, 2.07e11                    !输入材料 1 弹性模量为 207GPa
MP, NUXY, 1, 0.29                     !输入材料 1 泊松比为 0.29
MP, EX, 2, 3.3e9                      !输入材料 1 弹性模量为 3.3GPa
MP, NUXY, 2, 0.3                     !输入材料 2 泊松比为 0.3
```

MP, MU, 3, 0.3	!定义接触摩擦系数
! (4) 定义参数变量	
*SET, r, 12.7	!定义参数
*SET, w1, 0.8	
*SET, w, 4	
*SET, h, 2	
*SET, h1, 0.4	
*SET, n1, 8	
*SET, n2, 12	
*SET, n3, 8	
*SET, n4, 6	
*SET, n5, 4	
*SET, Fn, 10	
! (5) 建立简化后的球模型及划分网格	
CYL4, 0, r, r, -90	!生成 1/4 圆面
K, 4, 0, h1	!生成关键点 4
K, 5, w1, h1	!生成关键点 5
K, 6, w1, 0	!生成关键点 6
/PNUM, KP, 1	!开启显示关键点编号
/PNUM, LINE, 1	!开启显示线编号
/PNUM, AREA, 1	!开启显示面编号
L, 4, 5	!通过关键点 4 和关键点 5 生成线段 4
L, 5, 6	!通过关键点 5 和关键点 6 生成线段 5
LCOMB, 4, 5, 0	!合并线段 4 和线段 5 为线段 4, 删除原线段
ASBL, 1, 4	!面 1 被线段 4 分割成面 2 和面 3
K, 8, 0.6*r, r	!生成关键点 8
K, 9, 0.2*r, 0.2*r	!生成关键点 9
K, 10, 0, 0.2*r	!生成关键点 10
K, 11, 0.3*r, 0	!生成关键点 11
L, 9, 7	!通过关键点 9 和关键点 7 生成线段 1
L, 9, 8	!通过关键点 9 和关键点 8 生成线段 3
L, 9, 10	!通过关键点 9 和关键点 10 生成线段 4
L, 9, 11	!通过关键点 9 和关键点 11 生成线段 11
LCOMB, 1, 4, 0	!合并线段 1 和线段 4 为线段 12
LDELE, 1, 4, 3	!删除线段 1 和线段 4
ASBL, 3, 12	!面 3 被线段 12 分割成面 1 和面 4
ASBL, 4, 11	!面 4 被线段 11 分割成面 3 和面 5
ASBL, 5, 3	!面 5 被线段 3 分割成面 4 和面 6
AGLUE, ALL	!各面之间相互黏接
NUMCMP, ALL	!压缩编号消除空号
LSEL, S, LINE, , 3, 6, 3	!选择线段 3 和线段 6
LSEL, A, LINE, , 7, 10, 3	!再选择线段 7 和线段 10
LESIZE, ALL, , , n1	!将线段 3, 线段 6, 线段 7 和线段 10 划分 n1 份

```

LSEL, S, LINE, , 4, 5          !选择线段 4 和线段 5
LSEL, A, LINE, , 11, 14, 3     !再选择线段 11 和线段 14
LESIZE, ALL, , , n2           !将线段 4, 线段 5, 线段 11 和线段 14 划分 n1 份

LSEL, S, LINE, , 1, 8, 7       !选择线段 1 和线段 8
LESIZE, ALL, , , n3, 5, , , 1 !线段 1 和线段 8 以比例 5 划分 n1 份
LSEL, S, LINE, , 2             !选择线段 2
LESIZE, ALL, , , n3, 0.2, , , 1 !线段 2 以比例 0.2 划分 n1 份

LSEL, S, LINE, , 9             !选择线段 9
LSEL, A, LINE, , 12, 13        !再选择线段 12 和线段 13
LESIZE, ALL, , , n4           !将线段 9 线段, 12 和线段 13 划分 n1 份
TYPE, 1                         !为将要生成的接触单元指定类型
MAT, 1                          !选择编号 2 的材料
AMESH, ALL                     !对所有面进行网格划分
! (6) 建立下端的矩形板简化有限元模型及划分网格
RECTNG, 0, w, 0, -h
K, 15, w1, 0                   !生成关键点 15
K, 16, 0, -h1                  !生成关键点 16
K, 17, w1, -h1                 !生成关键点 17
L, 17, 15                      !通过关键点 17 和关键点 15 生成线段 19
L, 17, 16                      !通过关键点 17 和关键点 16 生成线段 20
L, 17, 12                      !通过关键点 17 和关键点 12 生成线段 21
LSEL, S, LINE, , 19, 20, 21    !选择线 19, 20, 21
ASBL, 6, ALL                   !面 6 被线 19, 20, 21 分割
ALLSEL                          !选择所有元素

LSEL, S, LINE, , 16, 19, 3     !选择线段 16 和线段 19
LSEL, A, LINE, , 25            !再选择线段 25
LESIZE, ALL, , , n1           !将线段 16, 线段 19 和线段 25 划分 n1 份

LSEL, S, LINE, , 15, 20, 5     !选择线段 15 和线段 20
LSEL, A, LINE, , 24            !再选择线段 24
LESIZE, ALL, , , n2           !将线段 15, 线段 20 和线段 24 划分 n2 份

LSEL, S, LINE, , 22, 23        !选择线段 22 和线段 23
LESIZE, ALL, , , n3, 0.2, , , 1 !线段 22 和线段 23 以比例 0.2 划分 n1 份
LSEL, S, LINE, , 21            !选择线段 21
LESIZE, ALL, , , n3, 5, , , 1 !线段 21 以比例 5 划分 n1 份

ASEL, S, AREA, , 7, 8, 9       !选择面 7, 面 8 和面 9
AGLUE, ALL                     !所选面之间相互黏接

```

```

TYPE, 1                                !为将要生成的接触单元指定类型
MAT, 2                                !选择编号 2 的材料
AMESH, ALL                             !对所选面进行网格划分
ALLSEL                                 !选择所有的元素
LREF, 4, , , 1, 4, 1, 1               !对线段 4 网格进行细分
LREF, 24, , , 1, 4, 1, 1             !对线段 24 网格进行细分
! (7) 生成接触对及设置实常数
MAT, 3                                !定义单元实常数
R, 3                                  !定义单元实常数
REAL, 3                                !选取单元实常数
ET, 2, TARGE169                       !选择目标面接触单元 TARGE169
ET, 3, CONTA171                       !选择接触面接触单元 CONTA 171
! Generate the target surface          !选取球上可能接触的圆弧作为目标面
LSEL, S, , , 4                        !选取圆弧线段 4
LSEL, A, , , 8                        !再选取圆弧线段 8
NSLL, S, 1                            !选择线段 4 和线段 8 上所有节点
NSLL, S, 0
TYPE, 2                                !为将要生成的接触单元指定类型
ESURF, ALL                             !对所有选择的节点生成接触单元
ALLSEL                                 !选择所有的元素

! Generate the contact surface         !选取平板上可能接触的线段作为接触面
LSEL, S, , , 24                       !选取圆弧线段 24
LSEL, A, , , 23                       !选取圆弧线段 23
NSLL, S, 1                            !选择线段 24 和线段 23 上所有节点
TYPE, 3                                !为将要生成的接触单元指定类型
ESURF, ALL                             !对所有选择的节点生成接触单元
ALLSEL                                 !选择所有的元素
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

R, 3, 0, 0, 1, 0.01                   !指定实常数的值
RMORE, 0.001, 0.0001
! (8) 耦合节点位移
NSEL, S, LOC, Y, r                    !选择坐标  $Y=r$  的节点
CP, 1, UY, ALL                        !耦合所有节点的  $Y$  方向位移
ALLSEL                                 !选择所有的元素

FINISH
! (9) 加载求解
/SOL                                  !进入求解模块
ANTYPE, STATIC
NLGEOM, ON                             !打开大变形选项
TIME, 1                               !指定载荷步分析结束时间
AUTOTS, ON                             !打开自动时间步长
NSUBST, 20, 1000, 20                 !指定载荷步数: 最大子步数和最小子步数

```

OUTRES, ALL, ALL	!将每一步求解结果写入结果文件
LNSRCH, ON	!使用线性搜索选项
PRED, ON	!打开时间步长预测器
LSEL, S, LOC, X, 0	!选择坐标 $X=0$ 的线段
DL, ALL, , UX	!对所选线段施加 $X$ 方向位移约束
ALLSEL	!选择所有的元素
DL, 15, , ALL	!对线段 L15 施加所有方向位移约束
LSEL, S, LINE, , 7, 14, 7	!选择线段 L7 和 L14
SFL, ALL, PRES, Fn	!施加载荷 $F_n$
ALLSEL	!选择所有的元素
SOLVE	!发出求解命令
FINISH	!退出求解模块
! (10) 进入一般后处理, 查看结果	
/POST1	!进入一般后处理模块
PLNSOL, S, EQV	!显示结构等效应力云图
PLNSOL, CONT, STAT, 0, 1.0	!显示接触状态
PLNSOL, CONT, PRES, 0, 1.0	!显示法向接触应力云图
PLNSOL, CONT, SFRIC, 0, 1.0	!显示摩擦切应力云图

6.5.3 实例分析：微动垫作用下的循环弯曲接触分析

1. 问题描述

微动垫作用下的循环弯曲接触分析模型如图 6-43 所示，微动关系由两个圆柱体夹住一个平板组成，根据对称性，可以简化为二维平面应变问题。平板左端固定，右端施加一个应力比为 0.1 的循环弯曲应力（加载波形为三角波），上圆柱承受一个集中力，下圆柱完全固定。模型的尺寸及其载荷的大小参见如表 6-9 和表 6-10。

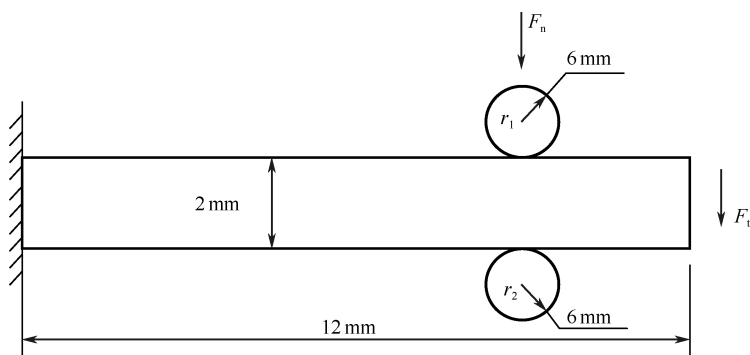


图 6-43 微动垫作用下的循环弯曲接触分析模型示意图

表 6-9 模 型 尺 寸

圆柱 1	半径 $r_1/\text{mm}$	6
	圆心角 $\varphi_1/(\text{^\circ})$	60
圆柱 2	半径 $r_2/\text{mm}$	6
	圆心角 $\varphi_2/(\text{^\circ})$	60
平板	长 $L/\text{mm}$	12
	高 $H/\text{mm}$	2

表 6-10 载 荷

压力 $P/\text{N}$	15
交变应力/ $\text{MPa}$	0.6

材料参数：半圆柱微动垫为刚体；平板试样的弹性模量为 210GPa，泊松比为 0.3。

## 2. 问题分析

此问题属于平面应变问题，几何模型可以完全对应图 6-43 所示来建立。约束及加载条件已完全给出，选择 PLANE82（2D）单元并开启大变形进行计算求解。

## 3. 建立工作文件名和工作标题

### 1) 定义工作文件名

依次单击：Utility Menu→File→Change Jobname，弹出“Change Jobname”对话框。在“[/FILNAM] Enter new jobname”选项的输入栏中输入工作文件名“EX6-6”，勾选“New log and error files”选项的复选框，设置为“Yes”，然后单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流：

```
/FILNAME, EX6-6
```

### 2) 定义工作标题

依次单击：Utility Menu→File→Change Title，弹出“Change Title”对话框，在“[/TITLE] Enter new title”选项的输入栏中输入“Bending Fretting of Plate and Pad”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流：

```
/TITLE, Bending Fretting of Plate and Pad
```

## 4. 定义单元类型和实常数

依次单击：Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete，弹出“Element Types”拾取对话框，单击“Add...”按钮，弹出“Library of Element Types”对话框，在“Library of Element Types”选项的左列表框中选择“Structural→Solid”，右列表框中选择“Quad 4node 82”，在“Element Type reference number”选项的输入栏中输入“1”，单击“OK”按钮关闭



该对话框。按照同样的方法定义单元类型 2, 3, 4, 5 并设置相应的实常数。单击“Element Types”拾取对话框上的“Close”按钮, 关闭该拾取对话框。

对应命令流:

```
ET,1,82
KEYOPT,1,3,2
ET,2,169
ET,3,172
R,2,0,0,1,0.01
RMORE,0.001,0.0001
KEYOPT,3,12,2
ET,4,169
ET,5,172
R,4,0,0,1,0.01
RMORE,0.001,0.0001
KEYOPT,5,12,2
```

## 5. 定义材料性能参数

### 1) 定义平板材料弹性参数

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Material Models, 弹出“Define Material Model Behavior”对话框。在“Material Models Available”选项中依次单击: Structural→Linear→Elastic→Isotropic, 弹出“Linear Isotropic Properties for Material Number 1”对话框, 在“EX”选项的输入栏中输入“210e3”, 在“PRXY”选项的输入栏中输入“0.3”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
MP,NUXY,1,0.3
MP,EX,1,210e3
```

### 2) 定义摩擦系数

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Material Models, 弹出“Define Material Model Behavior”对话框。在“Material Models Available”选项中依次单击: Structural→Friction Coefficient, 弹出“Friction Coefficient for Material Number 1”对话框, 在“MU”选项的输入栏中输入“0.3”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
MP,MU,1,0.3
```

### 3) 定义 Chaboche 随动硬化参数

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Material Models, 弹出“Define Material Model Behavior”对话框。在“Material Models Available”选项中依次单击: Structural→Nonlinear→Inelastic→Rate Independent→Kinematic Hardening Plasticity→Hill Plasticity→Chaboche, 弹出“Chaboche Kinematic Hardening for Material Number 1”对话框, 在“C1”~“C7”选项的输

入栏中依次输入“100”，“2.5e6”，“20000”，“9.43e4”，“1000”，“4000”，“3”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流：

```
TB,CHABOCHE,1,,3
TB,DATA,1,100,2.5e6,20000,9.43e4,1000,4000,
TB,DATA,,3
```

## 6. 定义参数变量

依次单击：Utility Menu→Parameters→Scalar Parameters，弹出“Scalar Parameters”对话框，在“Selection”选项的输入栏中输入“h=12”，单击“Accept”按钮。使用同样的方法生成其余参数变量，各参数变量参见表 6-11。单击“Close”按钮关闭该对话框。

**注意：**参数、命令及关键词不区分大小写。

表 6-11 参数变量及其对应值

参数变量	$H$	$A$	$L$	$R$	NUM	FVAL1	FVAL2
对应值	12	0.5	40	5	5	25	-20

对应命令流：

```
*SET,H,12
*SET,a,0.5
*SET,L,40
*SET,r,5
*SET,NUM,5
*SET,FVAL1,25
*SET,FVAL2,-20
```

## 7. 建立模型及划分网格

### 1) 生成平板面并划分出接触区

依次单击：Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Rectangle→By Dimensions，弹出“Creat Rectangle By Dimensions”对话框，分别在“X1,X2”和“Y1,Y2”选项的输入栏中输入“-1.5\*1”，“1”，“-h”，“0”，单击“OK”按钮。用同样的方法生成上接触区矩形，然后进行减法布尔运算。依次单击：Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→substrate→Areas，弹出“Substrate Areas”拾取对话框，依次单击上述生成的两个矩形完成减法布尔运算。再在同样位置生成接触区矩形，然后进行粘贴布尔运算。依次单击：Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Glue→Areas，弹出“Glue Areas”拾取对话框，依次单击上述生成的两个接触区矩形完成粘贴布尔运算。采用同样的方法完成下接触区矩形的划分，并与平板面粘贴。

对应命令流：

```
RECTNG,-1.5*L,L,-H,0
```

```

RECTNG,-A,A,-A,0
ASBA,1,2
RECTNG,-A,A,-A,0
AGLUE,1,3
RECTNG,-A,A,A-H,-H
ASBA,2,3
RECTNG,-A,A,A-H,-H
AGLUE,2,4

```

## 2) 划分上接触区网格

(1) 选择单元类型及材料常数。依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Meshing→Mesh Attributes→Default Attribs, 弹出“Meshing Attributes”对话框。在“TYPE”选项的下拉列表中选择“1 PLANE82”, 在“MAT”选项的下拉列表中选择“1”, 单击“OK”按钮完成设置。

(2) 布置网格种子。依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Meshing→MeshTool, 弹出“MeshTool”对话框。单击 Size Control→Lines 的“set”按钮, 弹出“Element Size on Picked Line”拾取对话框, 单击相应的线段完成种子布置。

(3) 勾选“MeshTool”对话框中“Shape”选项组中“Quad”和“Mapped”选项, 设置网格划分类型为映射四边形映射网格。

(4) 完成网格划分。

对应命令流:

```

TYPE,1
MAT,1
LESIZE,11,,,50
LESIZE,12,,,20,4
LESIZE,7,,,20,0.25
MSHAPE,0,2D
MSHKEY,1
AMESH,1

```

## 3) 划分下接触区网格

(1) 选择单元类型及材料常数。依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Meshing→Mesh Attributes→Default Attribs, 弹出“Meshing Attributes”对话框。在“TYPE”选项的下拉列表中选择“1 PLANE82”, 在“MAT”选项的下拉列表中选择“1”, 单击“OK”按钮完成设置。

(2) 布置网格种子。依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Meshing→MeshTool, 弹出“MeshTool”对话框。单击 Size Control→Lines 的“set”按钮, 弹出“Element Size on Picked Line”拾取对话框, 单击相应的线段完成种子布置。

(3) 勾选“MeshTool”对话框中“Shape”选项组中“Quad”和“Mapped”选项, 设置网格划分类型为映射四边形映射网格。

(4) 完成网格划分。

对应命令流:

```
LESIZE,16,,,50
LESIZE,17,,,20,0.25
LESIZE,5,,,20,4
MSHAPE,0,2D
MSHKEY,1
AMESH,2
```

#### 4) 划分平板网格

平板单元类型为三角形单元,采用自由分网。

对应命令流:

```
SMRT,3
MSHAPE,1,2D
MSHKEY,0
AMESH,3
```

#### 5) 建立上圆柱体及上接触关系

上圆柱体为刚体,所以可以只画出它的边界,即用代表其边界的一段圆弧来代替。建立刚性圆弧然后建立接触关系。

对应命令流:

```
ASEL,NONE
LSEL,NONE
WPAVE,,R
CSWPLA,11,1
K,22,R,-30
K,23,R,-150
K,24,0,0
L,23,22
TYPE,2
MAT,1
REAL,2
LESIZE,6,,,200
LMESH,ALL
KMESH,24
KSEL,S,KP,,24
NSLK,S
*GET,N_LOAD1,NODE,,NUM,MAX
ALLSEL
CSYS,0
NSEL,S,LOC,Y,0
NSEL,R,LOC,X,-A,A
TYPE,3
ESURF
```

### 6) 建立下圆柱体及下接触关系

下圆柱体为刚体，所以可以只画出它的边界，即用代表其边界的一段圆弧来代替。建立刚性圆弧然后建立接触关系。

对应命令流：

```
ASEL,NONE
LSEL,NONE
WPLANE,-1,0,-R-H,0,
CSWPLA,11,1
K,25,R,30
K,26,R,150
K,27,0,0
L,25,26
TYPE,4
MAT,1
REAL,4
LESIZE,8,,,200
LMESH,ALL
KMESH,27
ASEL,NONE
LSEL,NONE
KSEL,S,KP,,27
NSLK,S
*GET,N_LOAD2,NODE,,NUM,MAX
ALLSEL
CSYS,0
NSEL,S,LOC,Y,-H
NSEL,R,LOC,X,-A,A
TYPE,5
ESURF
FINISH
```

## 8. 加载求解

### 1) 定义求解类型

依次单击：Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis，弹出“New Analysis”对话框，选择分析类型为“Static”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流：

```
ANTYPE, STATIC
```

### 2) 求解控制器设置

依次单击：Main Menu→Solution→Analysis Type→Sol'n Controls，弹出“Solution Controls”对话框，如图 6-44 所示。首先对 Basic 选项卡进行设置，然后设置 Nonlinear 选项

卡,勾选“Nonlinear Options→Line search”选项的复选框,设置为“On”,在“DOF solution predictor”选项的下拉列表中选择“On after 1 substp”。单击“OK”按钮关闭该对话框。

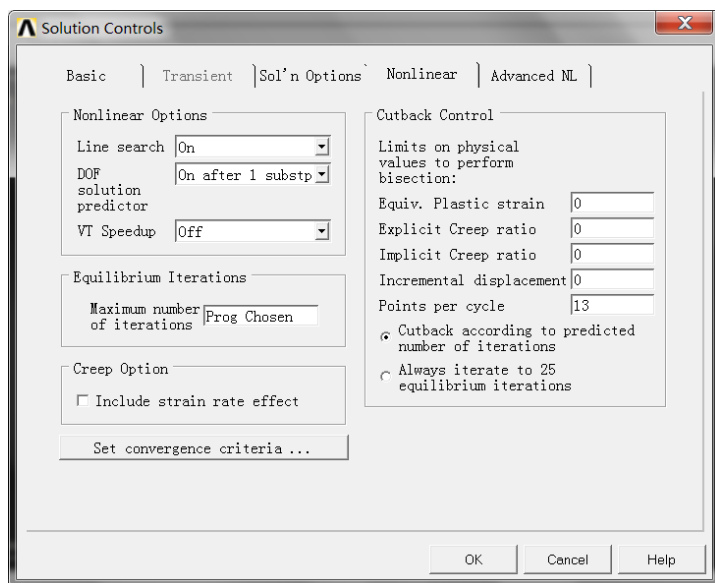


图 6-44 “Solution Controls”对话框

对应命令流:

```
NLGEOM, ON
AOTOTS, ON
NSUBST, 20, 1000, 20
OUTERS, ALL, ALL
LNSRCH, ON                !使用线性搜索选项
PRED, ON                  !打开时间步长预测器
```

### 3) 施加全位移约束

依次单击: Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Lines, 弹出“Apply U,ROT on Lines”拾取对话框,在其输入栏中输入“4”(也可在图形窗口中用鼠标点取 L4),单击“OK”按钮,弹出“Apply U,ROT on Lines”对话框,选择“UX”,“UY”,“ROTZ”选项,单击“OK”按钮。这样就对平板左端施加了全约束。

依次单击: Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Keypoints, 弹出“Apply U,ROT on KPs”拾取对话框,在其输入栏中输入“27”(也可在图形窗口中用鼠标点取关键点 n\_load2),单击“OK”按钮,弹出“Apply U,ROT on KPs”对话框,选择“All DOF”选项,单击“OK”按钮。这样就对下刚性圆弧施加了全约束。

对应命令流:

```
WPCSYS, -1, 0
NSEL, S, LOC, X, -1.5*L
D, ALL, ALL
D, N_LOAD2, ALL
```

4) 施加  $X$  方向位移约束

依次单击: Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Keypoints, 弹出“Apply U,ROT on KPs”拾取对话框, 在其输入栏中输入“24”(也可在图形窗口中用鼠标点取关键点 n\_load1), 单击“OK”按钮, 弹出“Apply U,ROT on KPs”对话框, 选择“UX”选项, 单击“OK”按钮。

对应命令流:

```
d,n_load1,,,,,ux,rotz
```

## 5) 施加法向载荷建立初始接触关系

依次单击: Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Force/Moment→On Keypoints, 弹出“Apply F/M on KPs”拾取对话框, 在图形窗口中用鼠标点取关键点 n\_load1, 单击“OK”按钮, 弹出“Apply F/M on Keypoints”对话框, 在“direction of force/mom”选项的下拉列表中选择“fy”, 在“VALUE”选项的输入栏中输入“-FVAL1”。单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
TIME,1
OUTRES,ALL,1
F,N_LOAD1,FY,-FVAL1
D,N_LOAD1,ALL
LSWRITE
```

## 6) 施加循环弯曲载荷

对应命令流:

```
*DO,I,1,NUM,1
TIME,2
OUTRES,ALL,1
NSEL,S,LOC,X,L
F,ALL,FY,FVAL2
ALLSEL
LSWRITE
TIME,3
OUTRES,ALL,1
NSEL,S,LOC,X,L
F,ALL,FY,0
ALLSEL
LSWRITE
TIME,4
OUTRES,ALL,1
NSEL,S,LOC,X,L
F,ALL,FY,0.1*FVAL2
ALLSEL
LSWRITE
```

```

TIME,5
OUTRES,ALL,1
NSEL,S,LOC,X,L
F,ALL,FY,0
ALLSEL
LSWRITE
*ENDDO
ALLSEL

```

### 7) 求解

依次单击：Main Menu→Solution→Solve→From Ls Files，弹出“Solve Load Step Files”对话框，在“LSMIN”，“LSMAX”及“LSINC”选项的输入栏中依次输入“1”，“1+4\*num”，“1”，单击“OK”按钮，ANSYS 开始求解计算。

对应命令流：

```
LSSOLVE,1,1+4*NUM
```

## 9. 进入一般后处理，查看结果

实验研究表明：在弯曲微动条件下，上接触区会产生疲劳裂纹，所以给出了最后一个循环中弯曲载荷最大时上接触区的相应应力分布云图，如图 6-45 所示。

对应命令流：

```

ASEL, S, , , 1
ALL SEL, BELOW, AREA
SET, LIST, 999
SET,,, , , 238
PLNSOL, S,X, 0,1.0           !X 方向应力云图
PLNSOL, S,Y, 0,1.0           !Y 方向应力云图
PLNSOL, S,XY, 0,1.0          !X-Y 方向应力云图
PLNSOL, S,EQV, 0,1.0         !等效应力云图

```

## 10. 进入时间后处理，查看结果

上接触区中心 Y 方向塑性应变随循环周次的变化可以用来说明弯曲微动过程中存在棘轮变形的产生，如图 6-46 所示给出了上接触中心 y 方向塑性应变随循环周次的演化图。

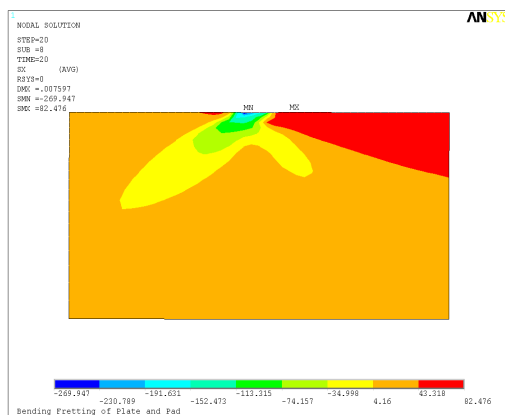
对应命令流：

```

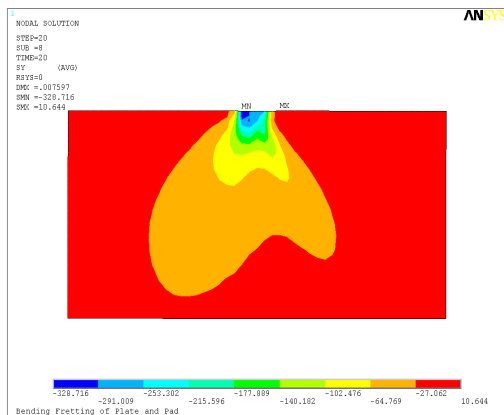
/post26
ANSOL,1,12,EPPL,Y,STRAINYP
/COLOR,CURVE,BLUE,1
/AXLAB,Step
/AXLAB,Y,Plastic Strain[mm/mm]
PLVAR,2

```

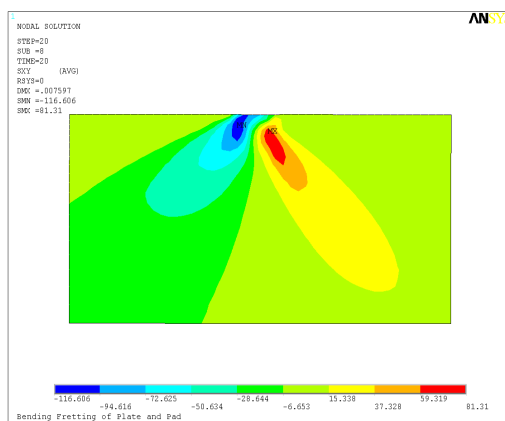




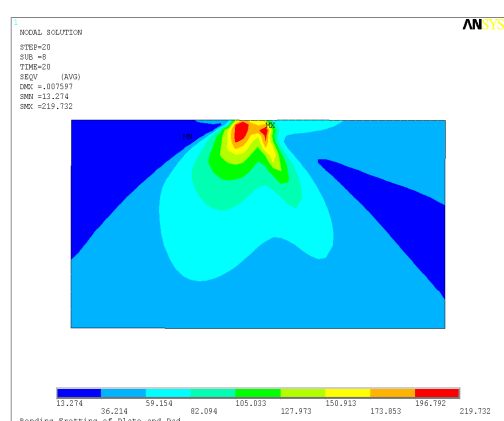
(a) X方向应力云图



(b) Y方向应力云图



(c) X-Y方向应力云图



(d) 等效应力云图

图 6-45 最后一个循环中相应的应力分布云图

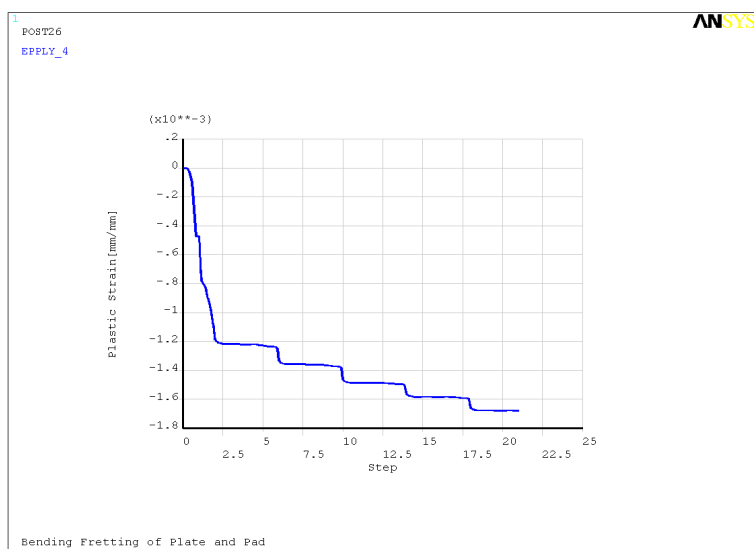


图 6-46 图形显示上接触中心 Y 方向塑性应变随循环周次的演化

## 11. 微动垫作用下的循环拉压接触分析完整命令流

FINISH	!退出以前模块
/CLEAR, START	!清除系统中所有数据，读取启动文件设置
! (1) 建立工作文件名和工作标题	
/FILENAME, EX6-6	
/TITLE, Bending Fretting of Plate and Pad	!定义标题
/PREP7	!进入前处理模块
! (2) 定义单元类型和实常数	
ET, 1, 82	!选择 PLANE82 (2D) 单元
KEYOPT, 1, 3, 2	!平面应变问题
ET, 2, 169	!选择 169 接触单元
ET, 3, 172	!选择 172 接触单元
R, 2, 0, 0, 1, 0.01	
RMORE, 0.001, 0.0001	
KEYOPT, 3, 12, 2	
ET, 4, 169	!选择 169 接触单元
ET, 5, 172	!选择 172 接触单元
R, 4, 0, 0, 1, 0.01	
RMORE, 0.001, 0.0001	
KEYOPT, 5, 12, 2	
! (3) 定义材料性能参数	
MP, NUXY, 1, 0.3	!材料 1 泊松比为 0.3
MP, EX, 1, 210e3	!材料 1 弹性模量为 210GPa
MP, MU, 1, 0.3	!材料 1 摩擦系数为 0.3
TB, CHABOCHE, 1, , 3	!定义 CHABOCHE 模型
TBDATA, 1, 100, 2.5e6, 20000, 9.43e4, 1000, 4000,	!CHABOCH 模型前六个参数
TBDATA, , 3	!CHABOCH 模型第七个参数
! (4) 定义参数变量	
*SET, H, 12	!定义参数
*SET, a, 0.5	
*SET, L, 40	
*SET, r, 5	
*SET, NUM, 5	
*SET, FVAL1, 25	
*SET, FVAL2, -20	
! (5) 建立模型及划分网格	
RECTNG, -1.5*L, L, -H, 0	!创建平板面矩形
RECTNG, -A, A, -A, 0	!创建上接触区矩形
ASBA, 1, 2	!平板面矩形与上接触区矩形相减
RECTNG, -A, A, -A, 0	!创建上接触区矩形
AGLUE, 1, 3	!将两个矩形面粘贴
RECTNG, -A, A, A-H, -H	!创建下接触区矩形

ASBA, 2, 3	!矩形面相减
RECTNG, -A, A, A-H, -H	!创建下接触区矩形
AGLUE, 2, 4	!矩形面粘贴
TYPE, 1	!选择单元类型 1
MAT, 1	!选择材料模型 1
LESIZE, 11, , , 50	!将线段 11 分成 50 份
LESIZE, 12, , , 20, 4	!将线段 12 分成 20 份, 每段的长度按比例
	!增加, 最后一段的长度为第一段的 4 倍
LESIZE, 7, , , 20, 0.25	!将线段 7 分成 20 份, 每段的长度按比例
	!递减, 最后一段的长度为第一段的 0.25 倍
MSHAPE, 0, 2D	!网格类型为二维网格
MSHKEY, 1	!映射网格
AMESH, 1	!对面 1 进行网格划分
ALLSEL	
LESIZE, 16, , , 50	!将线段 16 分成 50 份
LESIZE, 17, , , 20, 0.25	!将线段 17 分成 20 份, 每段的长度按比例
	!递减, 最后一段的长度为第一段的 0.25 倍
LESIZE, 5, , , 20, 4	!将线段 5 分成 20 份, 每段的长度按比例
	!增加, 最后一段的长度为第一段的 4 倍
MSHAPE, 0, 2D	!网格类型为二维网格
MSHKEY, 1	!映射网格
AMESH, 2	!对面 2 进行网格划分
ALLSEL	
SMRT, 3	!网格划分精度设置为 3
MSHAPE, 1, 2D	!网格类型为二维网格
MSHKEY, 0	!自由网格
AMESH, 3	!对面 3 进行网格划分
ASEL, NONE	
LSEL, NONE	
WPAVE, , R	!设置工作平面原点为 (0, R)
CSWPLA, 11, 1	!设置工作平面坐标系为极坐标
K, 22, R, -30	!生成关键点 22
K, 23, R, -150	!生成关键点 23
K, 24, 0, 0	!生成关键点 24
L, 23, 22	!通过关键点 23 和关键点 22 生成圆弧
TYPE, 2	!设置单元类型为 2 号单元
MAT, 1	!设置材料模型为 1 号模型
REAL, 2	!设置实常数为 2 号实常数
LESIZE, 6, , , 200	!将圆弧 6 分为 200 份
LMESH, ALL	!划分所有线段的网格

KMESH, 24	!对关键点 24 进行网格划分
KSEL, S, KP, , 24	!选择关键点 24
NSLK, S	!通过关键点选择节点
*GET, N_LOAD1, NODE, , NUM, MAX	!将选择的节点定义为 N_LOAD2
ALLSEL	
CSYS, 0	!回到默认坐标系
NSEL, S, LOC, Y, 0	!选择 Y 坐标为 0 的所有节点
NSEL, R, LOC, X, -A, A	!筛选出所选节点中 X 坐标在[-A, A]内所有节点
TYPE, 3	!设置单元类型为 3 号单元
ESURF	!建立没标单元
ASEL, NONE	
LSEL, NONE	
WPLANE, -1, 0, -R-H, 0,	!将工作平面原点移动到点 (0, -R-H, 0)
CSWPLA, 11, 1	!设置坐标系为极坐标系
K, 25, R, 30	!生成关键点 25
K, 26, R, 150	!生成关键点 26
K, 27, 0, 0	!生成关键点 27
L, 25, 26	!通过关键点 25 和关键点 26 生成圆弧
TYPE, 4	!设置单元类型为 4 号单元
MAT, 1	!设置材料模型为 1 号材料
REAL, 4	!设置实常数为 4 号实常数
LESIZE, 8, , , 200	!将圆弧 8 分成 200 份
LMESH, ALL	!划分所有线段的网格
KMESH, 27	!对关键点 27 进行网格划分
KSEL, S, KP, , 27	!选择关键点 27
NSLK, S	!通过关键点选择节点
*GET, N_LOAD2, NODE, , NUM, MAX	!将选择的节点定义为 N_LOAD2
ALLSEL	!全选择
CSYS, 0	!将坐标系设置为默认坐标系
NSEL, S, LOC, Y, -H	!选择 Y 坐标为-H 的所有节点
NSEL, R, LOC, X, -A, A	!筛选出所选节点中 X 坐标在[-A, A]内所有节点
TYPE, 5	!设置单元类型为 5 号单元
ESURF	!生成目标单元
FINISH	!完成
/SOLU	!进入求解模块
/COLOR, U, BLUE	!设置颜色为蓝色
NLGEOM, ON	!开启大变形
AOTOTS, ON	!开启自动增量步
NSUBST, 20, 1000, 20	!指定载荷步数: 最大子步数和最小子步数
OUTERS, ALL, ALL	!将每一步求解结果写入结果文件
LNSRCH, ON	!使用线性搜索选项
PRED, ON	!打开时间步长预测器
WPCSYS, -1, 0	!设置工作平面坐标系为直角坐标系

```

NSEL, S, LOC, X, -1.5*L      !选择 X 坐标为-1.5*L 的所有节点
D, ALL, ALL                  !对多选节点施加全位移约束
D, N_LOAD2, ALL              !对 N_LOAD2 节点施加全位移约束
ALLSEL                       !全选择
D, N_LOAD1, , , , , UX, ROTZ !对 N_LOAD1 节点施加 X 方向的位移约束
! (6) 加载求解
TIME, 1                      !载荷步结束时间为 1
OUTRES, ALL, 1               !输出每个子步的计算结果
F, N_LOAD1, FY, -FVAL1       !对 N_LOAD 节点施加 Y 方向的集中力, 大小为-FVAL1
D, N_LOAD2, ALL              !对 N_LOAD2 节点施加全位移约束
LSWRITE                      !写入载荷步

*DO, I, 1, NUM, 1            !定义循环
TIME, 2                      !载荷步结束时间为 2
OUTRES, ALL, 1               !输出每个子步的计算结果
NSEL, S, LOC, X, L           !选择 X 坐标为 L 的所有节点
F, ALL, FY, FVAL2            !对所选节点施加 Y 方向的集中力, 大小为 FVAL2
ALLSEL                       !全选择
LSWRITE                      !写入载荷步
TIME, 3                      !载荷步结束时间为 3
OUTRES, ALL, 1               !输出每个子步的计算结果
NSEL, S, LOC, X, L           !选择 X 坐标为 L 的所有节点
F, ALL, FY, 0                !对所选节点施加 Y 方向的集中力, 大小为 0
ALLSEL                       !全选择
LSWRITE                      !写入载荷步
TIME, 4                      !载荷步结束时间为 4
OUTRES, ALL, 1               !输出每个子步的计算结果
NSEL, S, LOC, X, L           !选择 X 坐标为 L 的所有节点
F, ALL, FY, 0.1*FVAL2        !对所选节点施加 Y 方向的集中力, 大小为 0.1*FVAL2
ALLSEL                       !全选择
LSWRITE                      !写入载荷步
TIME, 5                      !载荷步结束时间为 5
OUTRES, ALL, 1               !输出每个子步的计算结果
NSEL, S, LOC, X, L           !选择 X 坐标为 L 的所有节点
F, ALL, FY, 0                !对所选节点施加 Y 方向的集中力, 大小为 0
ALLSEL                       !全选择
LSWRITE                      !写入载荷步
*ENDDO                       !结束循环
ALLSEL                       !全选择
LSSOLVE, 1, 1+4*NUM          !按照载荷步求解, 从 1 到 1+4*NUM
! (7) 进入一般后处理, 查看结果
/POST1
ASEL, S, , , 1               !选择面 1
ALLSEL, BELOW, AREA          !选择面 1 下的所有选项

```

```

SET,,,,,,,,,238                !选择序列 238
PLNSOL, S, X, 0, 1.0            !X-Y 方向应力云图
PLNSOL, S, Y, 0, 1.0            !X-Y 方向应力云图
PLNSOL, S, XY, 0, 1.0           !X-Y 方向应力云图
PLNSOL, S, EQV, 0, 1.0          !等效应力云图
!(8) 进入时间后处理, 查看结果
/POST26
ANSOL, 1, 192, EPPL, Y, STRAINYP !提取节点 192 的 Y 方向塑性应变
/COLOR, CURVE, BLUE, 1         !设置线条颜色为蓝色
/AXLAB, STEP                    !设置 X 轴标题为 STEP
/AXLAB, Y, PLASTIC STRAIN[MM/MM] !设置 Y 轴标题为
                                !PLASTIC STRAIN[MM/MM]
PLVAR, 2                        !画图

```

## 本章小结

本章主要介绍了非线性的基本概念及其分类, 对其分析基本过程进行了详细介绍。从总体上来说, 非线性的求解思路和求解过程与其他一般的结构分析是类似的, 但是其非线性本质与其他问题是有区别的。在使用 ANSYS 过程中尤其要注意其非线性求解选项设置的问题。在几何非线性分析中, 要注意开启大变形选项, 掌握屈曲分析的通用步骤; 对于材料非线性分析, 最主要的是掌握常用材料本构关系适用范围, 以及其如何设置; 而接触分析则要学会如何设置接触对, 掌握接触对设置向导。

## 思考题

- (1) 产生非线性的原因有哪些?
- (2) 非线性分析基本步骤有哪些, 与静力分析有何区别?
- (3) 如何开启大变形分析, 屈曲分析的通用步骤有哪些?
- (4) 经典双线性随动强化和双线性等向强化有何区别, 多线性随动强化和多线性等向强化有何不同?
- (5) 产生的接触对有几种模型, 如何设置接触对?

## 常见疑难问题解析

在本章的实例操作过程中, 或者在做其他 ANSYS 练习可能会遇到的一些问题, 结合本章, 汇总如下。

(1) 在做结构的非线性分析时, 设置每一个载荷步为 20 个子步, 可是 ANSYS 计算的过程中, 大多数只计算 5 个子步, 这是怎么回事呢?

设定的子步数只是预设值, 程序会在求解时根据具体情况进行计算, 并不是设多少就计算多少步的, 不影响求解实质。



(2) 接触问题的划分网格有什么要求?

两个接触表面, 在划分网格时, 应使得在接触面上的节点是重合的, 即接触对上的网格能很好的对应。这部分工作在建模时就要充分考虑到。

(3) 接触问题有间隙存在时还能做接触分析吗?


能分析, 可以通过下面的几种方法来实现: ①建模时直接将接触体建在刚好接触的位置; ②通过施加位移约束来将接触体移到接触位置上; ③通过软弹簧把两个分开的物体连接起来, 采用动态方法求解。

(4) 结构计算完成后怎样画出某节点或单元的应力-应变关系曲线?

① 定义变量。依次单击: Main Menu→Time Hist Postproc, 弹出 “Time History Variables” 对话框中, 单击工具栏  按钮, 弹出 “Add Time-History Variables” 对话框, 选取第一个变量 Stress, 变量名称为 SY\_2, 确定与之对应的下一级选项 (如 Y-Component of stress 等); 返回 “Add Time-History Variables” 对话框, 再单击  按钮, 选取第二个变量 Elastic Strain, 变量名称为 EPELY\_3, 以及确定对应的下一级选项 (如 Y-Component of elastic strain 等, 在应力-应变图中, 其向量的取向应该相同)。同理再定义变量 EPPLY\_4, 选取变量 Plastic Strain 及与之对应的下一级选项 (如 Y-Component of plastic strain 等), 在应力-应变图中, 应变是弹性应变和塑性应变累加的总应变。为使其实现相加, 还需进行以下操作, 返回 “Add Time-History Variables” 对话框, 在 “Calculator” 选项的等号左边输入 “5”, 右边输入 “ansol(12,EPEL,Y)+ansol(12,EPPL,Y)”, 单击 “Enter” 按钮, 则出现变量名为 8 的一行数。

② 绘制应力-应变曲线。

为坐标轴添加标题, 依次单击: Utility Menu→PlotCtrls→Style→Graphs→Modify Axe。在 “[AXLAB] X-axis label” 选项的输入栏中输入 “Strain\_Y”, 在 “[AXLAB] Y-axis label” 选项的输入栏中输入 “Stress\_Y”, 单击 “OK” 按钮。

绘制应力-应变曲线, 在 “Time History Variables” 对话框中勾选 “Name: 8→X-Axis” 选项, 然后单击 “Name: SY\_2” 所在的行, 单击工具栏中  按钮即可。

具体过程在二力杆件的大变形分析和基于 CHABOCHE 循环本构模型下的应力-应变响应都有用到, 刚开始可以尝试模仿操作步骤进行练习。



## 第 7 章 疲劳断裂问题分析



### 知识点

- 疲劳断裂概述
- 断裂疲劳问题分析的基本步骤

### 7.1 疲劳断裂概述

在结构设计的传统概念中,通常采用材料强度设计结构组件。这种材料强度设计的概念没有考虑到由于裂纹的存在而导致的应力集中现象。而正是由于集中应力的出现,才导致了结构的突然失效。断裂力学的出现,就是为了解决结构中的裂纹和孔洞等缺陷问题。它关注的就是结构中存在的孔洞等缺陷,而且采用材料的断裂韧性代替材料强度作为固有的材料参数。

断裂分析中的典型断裂准则包括能量准则和应力强度因子准则。采用能量准则时,由裂纹的单位扩展量需要的能量(能量扩展速率)来表征材料断裂韧度;采用应力强度因子准则时,由裂尖应力应变场的临界值来表征材料断裂韧度。在特定的条件下,两种断裂准则是等效的。

根据外加应力和裂纹面的取向关系,主要包括如图 7-1 所示的三种裂纹类型。

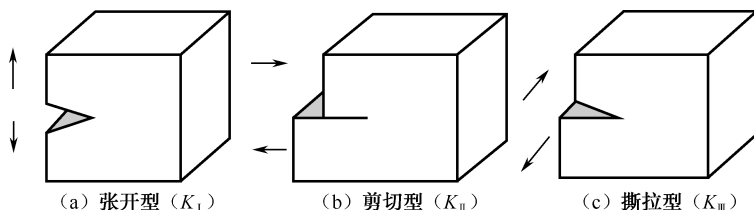


图 7-1 裂纹类型

当外加应力方向垂直于裂纹面时,即为张开型裂纹,如图 7-1 (a) 所示;当外加应力方向位于裂纹面内且垂直于裂纹前沿时,即为剪切型裂纹,如图 7-1 (b) 所示;当外加应力方向位于裂纹面内且平行于裂纹前沿时,即为撕裂型裂纹,如图 7-1 (c) 所示。

无论是描述能量扩展速率还是裂尖的应力应变场大小,下面 3 个断裂参数是应用最广泛的:

- (1) 应力强度因子;



(2) 能量释放率;

(3) J 积分。

其中, 应力强度因子和能量释放率只能适用于线弹性问题, 而 J 积分还能适用于非线性弹塑性问题。

### 7.1.1 应力强度因子定义

对于线弹性材料, 其裂尖附近区域的应力应变场为

$$\begin{cases} \sigma_{ij} = -\frac{K}{\sqrt{r}} f_{ij}(\theta) \\ \varepsilon_{ij} = -\frac{K}{\sqrt{r}} g_{ij}(\theta) \end{cases} \quad (7-1)$$

式中  $K$  —— 应力强度因子;

$r$  和  $\theta$  —— 裂尖极坐标下的坐标参量。

### 7.1.2 J 积分定义

J 积分是描述弹塑性断裂问题中应用最广泛的参量, 其定义为

$$J = \lim_{\Gamma \rightarrow 0} \int_{\Gamma_0} \left[ (W + T) \delta_{li} - \sigma_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_l} \right] n_i d\Gamma \quad (7-2)$$

式中  $W$  —— 应变能密度;

$T$  —— 动能密度;

$\sigma_{ij}$  —— 应力;

$u_j$  —— 位移矢量;

$\Gamma$  —— 积分路径。

对于线弹性材料中裂纹, J 积分代替了能量释放率。同样, 对于非线性弹塑性材料, 裂尖应力应变场的大小由 J 积分来描述。

### 7.1.3 能量释放率定义

能量释放率的概念是从一种虚设的裂纹扩展状态研究起的, 用于计算裂纹张开或闭合时所用的功 (能量改变)。因此, 在计算能量释放率时通常采用虚拟裂纹扩展方法。根据虚拟裂纹扩展理论, 在计算能量释放率时必须通过 ANSYS 进行裂纹扩展前后两次应力应变分析, 然后通过后处理根据两次应力应变分析分别计算出扩展前后的应变能  $U_a$  和  $U_{a+\Delta a}$ , 最后根据能量释放率的概念得到能量释放率  $G$  的计算表达式为

$$G = -\frac{U_{a+\Delta a} - U_a}{b\Delta a} \quad (7-3)$$

式中  $b$ ——所建立断裂模型的厚度。

在 ANSYS 软件中, 给用户提供了便捷的 APDL 命令[NSCALE], 通过该命令, 用户可以在原来裂纹模型的基础上, 通过将裂纹尖端附近的所有节点在裂纹扩展方向上按照因子 $\Delta a$ 进行缩放, 从而获得裂纹长度为  $a+\Delta a$  的裂纹模型, 即扩展后的裂纹模型。具体的 GUI 操作路径: Main Menu→Preprocessor→-Modeling-Operate→Scale。

**注意:** 若采用实体模型, 在对所有节点缩放前, 必须解除实体模型与有限元模型的关联, 具体的 APDL 命令和 GUI 操作路径: [MODMSH,DETACH](Main Menu→Preprocessor→Checking Ctrl)s)。裂纹附近节点通常是指以裂纹尖端为原点、半径为  $a/2$  的圆内的全部节点。缩放因子 $\Delta a$  一般应取裂纹长度的 0.5%~2%。

## 7.2 断裂疲劳问题分析的基本步骤

断裂分析实际上是应力应变分析和断裂力学参量计算的组合。由于裂尖附近区域存在很高的应力梯度, 因此对带裂纹体裂尖区域的网格划分和单元选取需要特别的注意。

### 7.2.1 建立断裂模型

对于裂纹的边缘, 在 2D 模型中称为裂尖, 在 3D 模型中称为裂纹前缘。如图 7-2 所示给出了两种模型下裂纹边缘区域的坐标体系。

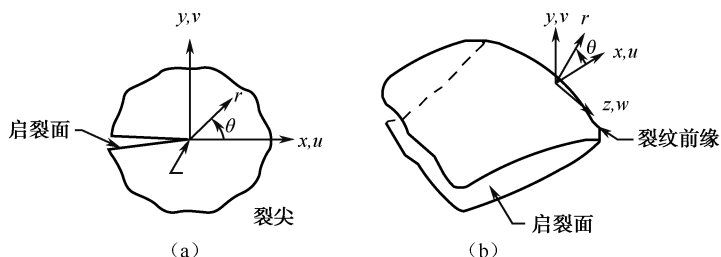


图 7-2 裂纹坐标体系

#### 1. 裂尖区域的模拟

在裂尖附近区域存在高梯度的应力应变场, 而这些区域的准确特征依赖于材料、几何和其他因素。为了能够抓住剧烈变化的应力应变场, 需要对裂尖附近区域进行网格加密处理。对于线弹性问题, 裂尖附近(裂纹前缘)的位移随 $\sqrt{r}$ 而变化,  $r$ 是距离裂尖的距离。裂尖应力应变场是奇异的, 随着 $1/\sqrt{r}$ 变化。为生成应力应变的奇异性, 对裂尖区域的单元划分应包含以下两个特性:

(1) 上下裂纹面需要保持一致;

(2) 围绕裂尖(裂纹前缘)的单元应是二次奇异单元, 其中间节点被移至 1/4 边处, 如图 7-3 所示, PLANE183 为 2D 奇异单元, SOLID186 为 3D 奇异单元。

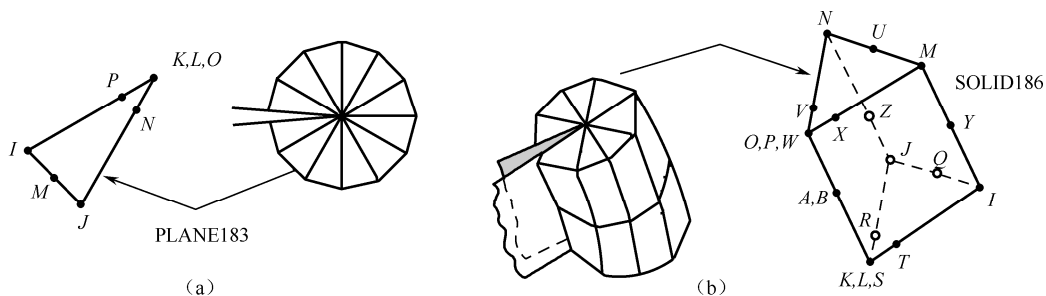


图 7-3 2D 和 3D 模型奇异单元

## 2. 模拟 2D 线弹性断裂问题

模拟二维断裂问题时, ANSYS13.0 推荐使用八节点四边形实体单元 PLANE183。围绕裂尖的第一层单元, 必须是奇异的。在 ANSYS13.0 里面可以通过 KSCON 命令来指定围绕某个关键点的单元网格大小, 这对断裂模型的建立十分有用, GUI 操作路径: Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→Concentrat KPs→Create。它可以围绕指定关键点自动生成奇异单元, 同时还可以指定第一层单元的尺寸大小、环向数目等参数。如图 7-4 所示给出了标准 CT 断裂试样的 1/2 有限元网格对称模型, 在裂尖区域采用 2D 奇异单元 PLANE183 进行网格划分。

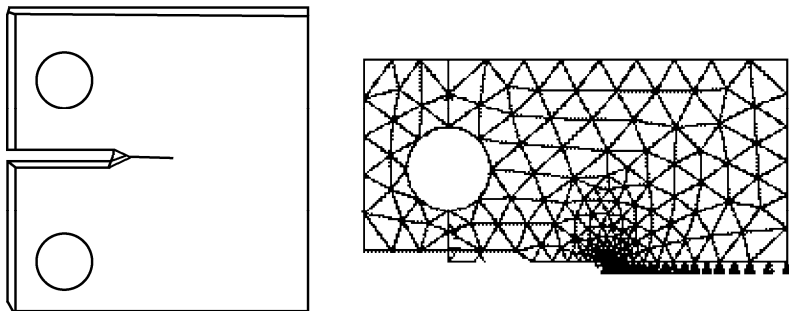


图 7-4 2D 断裂模型

基于结构模型的对称性, 在多数情况下, 可以只需要模拟一半模型, 然后施加相应的对称或反对称边界条件, 如图 7-5 所示。

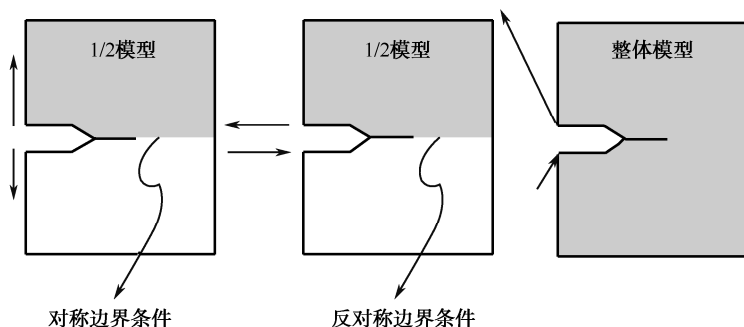


图 7-5 结构模型类型

为了获得理想的结果，围绕裂尖第一层单元的径向尺寸不能超过  $a/8$ ，其中  $a$  为裂纹尺寸。在环向方向上，推荐每个单元所占的角度为  $30^\circ$  或  $40^\circ$ 。裂尖单元形状不能发生扭曲，应该是一组等腰三角形。

### 3. 模拟 3D 线弹性断裂问题

模拟三维断裂问题时，ANSYS13.0 推荐使用二十节点块体单元 SOLID186。围绕裂尖前缘的第一层单元，必须是奇异的。

**注意**，单元形状是楔形，其 KLPO 面退化为一条线 KO。

相对二维裂纹模型，建立三维裂纹模型需要考虑更多的因素。此时，KSCON 命令已经不再适用。同时，必须确保裂纹前缘沿着单元的 KO 边。单元尺寸大小与 2D 模型一致，此外，任意方向上的单元相邻边的比例不能超过 4:1。对曲线裂纹前沿而言，沿着裂纹前缘的单元大小依赖于局部曲率的大小。通常推荐，沿着环形裂纹前缘上每隔  $15^\circ \sim 30^\circ$  之间至少要有一个单元。注意，单元的每个边必须是直线，包括位于裂纹前缘的单元边。

## 7.2.2 施加有限元边界条件

参见第 3 章静力学分析。

## 7.2.3 进行弹塑性分析

参见第 3 章静力学分析。

## 7.2.4 计算断裂参数

ANSYS 里面，允许计算以下断裂参数：

- J 积分。
- 应力强度因子。

J 积分的计算是在 ANSYS 应力应变场求解过程中实现，其结果存储在结果文件 (.rst) 中，便于后续的后处理运算。为了实现 J 积分运算，需要使用 CINT 命令。而应力强度因子的计算是在一般后处理器 (POST1) 中通过 KCALC 命令实现。

### 1. J 积分计算

ANSYS 里 J 积分计算，基于 Shih 教授提出的显示积分方法实现。对于 2D 问题显示积分是一个面积分，而 3D 问题显示积分是一个体积分。面积分和体积分提供了比路径积分和曲面积分更高的精度，并且更容易进行数值实现，其本身使用就非常便利。

#### 1) 显示积分法概念

对于 2D 问题，考虑热应变、依赖于塑性应变的路径、积分面内的体力和裂纹面上的压力时，J 积分的显示积分表达式为

$$J = \int_A \left[ \sigma_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - W \delta_{li} \right] \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial x_i} dA \quad (7-4)$$

式中  $\mathbf{q}$ ——裂纹扩展向量。 $\mathbf{q}$  的方向与裂尖局部坐标系的  $x$  轴方向一致。定义沿路径上的节点  $\mathbf{q}$  向量为零, 而且路径内所有节点的  $\mathbf{q}$  向量是一个单位向量, 除了直接与路径相连的中间节点外。ANSYS 将这些带有单位  $\mathbf{q}$  向量的节点定义为虚拟裂纹扩展节点。

对于高阶单元 (如 PLANE183 和 SOLID186), 中间节点的  $\mathbf{q}$  向量为相应角上节点  $\mathbf{q}$  矢量的平均值。下面给出了 J 积分的离散形式, 即

$$J = \sum_{ie=1}^{ne} \left[ \sigma_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - W \delta_{li} \right] \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial x_i} W_{iw} dA_{ie} \quad (7-5)$$

式中  $ne$ ——积分单元数目;

$W_{iw}$ ——权函数;

$A_{ie}$ ——第  $i$  个单元  $ie$  的面积。

对于 3D 问题, 裂尖节点为沿着裂纹前缘上的所有节点。3D 问题 J 积分计算类似于 2D 问题。ANSYS13.0 中支持 J 积分和应力强度因子计算的单元包括: PLANE182、PLANE183、SOLID185、SOLID186、SOLID187、SOLID272、SOLID273、SOLID285 等, 支持的材料行为包括线弹性和塑性等。

## 2) J 积分计算步骤

### (1) 初始化 J 积分计算。

通过 CINT 命令的 NEW 选项来启动 J 积分计算, 其对应命令为

```
CINT,NEW,n
```

其中,  $n$  为 J 积分计算的标签。

### (2) 定义裂纹信息。

通过 CINT 命令指定 J 积分计算所必须的两个参数为裂尖节点和裂纹扩展方向, ANSYS13.0 提供了两种方法来定义裂纹信息。

方法一, 定义裂尖节点组件和裂纹平面法向量。该方法适用于 2D 裂纹几何和 3D 平面裂纹面, 它为 3D 模型 J 积分的计算提供了便利, 因为只需要指定裂纹尖端的节点组件和裂纹平面的法向量。

对于 2D 裂纹几何, 通常定义的裂尖节点组件为裂尖位置节点, 当然, 也允许将围绕裂尖的一组节点包括进去。对于 3D 平面裂纹几何, 裂尖节点组件必须包括裂纹前缘上的所有节点。ANSYS 会自动由这些节点来生成 J 积分路径的必要信息。具体的对应命令为

```
CINT, CTNC, CMANAME
```

然后, 通过 CINT 命令的 NORMAL 选项定义裂纹平面的法向量。ANSYS 会将其自动转化为裂纹扩展向量  $\mathbf{q}$ 。 $\mathbf{q}$  向量垂直于由裂纹面法向和裂尖节点的切向所构成的面, 而且是一个正交化的单位向量。具体的对应命令为

```
CINT, NORMAL, par1, par2
```

其中, par1 是坐标系标号, par2 是坐标系的坐标轴。

方法二, 定义裂纹扩展节点组件和裂纹扩展方向。该方法适用于 3D 曲面裂纹面, 此时不存在一个特定的法向。尽管如此, 必须指定每一裂尖节点位置处的裂纹扩展节点组件和扩展方向。该方法常用在裂纹面为曲面或裂纹前缘是一组节点的时候, 如坍塌的裂尖网格。具体方法如下:

- 定义由一个或更多节点构成的节点组来形成裂尖。

```
CINT, CENCOMP, CMNAME
```

- 指定裂尖节点, 如果没有指定裂尖位置节点, 则默认为节点组件中的第一个节点。

```
CINT, CENCOMP, CMNAME, node1
```

- 定义裂纹扩展方向, 指定裂纹的局部坐标系, 以及裂纹扩展的可能方向(坐标轴方向)。

```
CINT, CENCOMP, CMNAME, node1, 11, 2
```

此外, 可以直接指定全局坐标的  $X$ ,  $Y$  和  $Z$  方向作为裂纹扩展矢量。

```
CINT, CENCOMP, CMNAME, node1, , compx, compy, compz
```

按照上述方法, 定义裂纹前缘上的所有节点。

(3) 指定积分路径的编号。

按照下命令格式指定  $J$  积分的计算路径, 即

```
CINT, NCONTOUR, n
```

对 3D 裂纹几何, 裂纹前缘上的节点的积分路径是一致的。

(4) 定义裂纹对称性条件。

如果裂纹位于一个对称平面上, 但只建立了一半裂纹模型, 此时需要通过以下命令指定对称性条件, 即

```
CINT, SYMM, ON
```

(5) 指定输出控制。

ANSYS 计算  $J$  积分的结果输出由 OUTRES 命令控制, 可以通过以下命令指定输出间隔, 即

```
OUTRES, CINT, n
```

## 2. 应力强度因子计算

ANSYS13.0 计算应力强度因子有以下两种方法:

- 交叉积分法——在后处理前的求解过程中进行。
- 位移外推法——在后处理中进行。

### 1) 交叉积分法

类似  $J$  积分的显示积分方法, 交叉积分对 2D 问题是面积分, 而对 3D 问题是体积分。对比传统的位移外推法计算应力强度因子, 交叉积分法提供了更高的精度、较低的网格要求, 以及使用的便利性。

(1) 交叉积分法的模式。

交叉积分的计算公式为

$$I = - \int_V q_{i,j} (\sigma_{kl} \varepsilon_{kl}^{aux} \delta_{ij} - \sigma_{kj}^{aux} u_{k,i} - \sigma_{ki}^{aux} u_{k,j}) dV / \int_s \delta q_n ds \quad (7-6)$$

式中  $\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}, u_i$  —— 分别为应力、应变和位移；

$\sigma_{ij}^{aux}, \varepsilon_{ij}^{aux}, u_i^{aux}$  —— 分别为辅助场里的应力、应变和位移；

$q_i$  —— 裂纹扩展向量。

交叉积分的应力强度因子公式为

$$I = \frac{2}{E^*} (K_1 K_1^{aux} + K_2 K_2^{aux}) + \frac{1}{\mu} K_3 K_3^{aux} \quad (7-7)$$

式中  $K_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) —— 三种裂纹模式的应力强度因子；

$K_i^{aux}$  ( $i=1, 2, 3$ ) —— 辅助模式的应力强度因子；

$E^* = E$  (平面应力) 或  $E/(1-\nu^2)$  (平面应变)； $E$  是杨氏模量， $\nu$  是泊松比， $\mu$  是剪切模量。

(2) 应力强度因子计算步骤。

ANSYS13.0 通过命令 CINT 的 SIFS 选项启动应力强度因子计算。类似 J 积分的计算，CINT 命令被用来指定计算的必需参数。

① 初始化应力强度因子计算。

通过如下命令启动应力强度因子计算，即

```
CINT, NEW, n
CINT, TYPE, SIFS
```

其中， $n$  是应力强度因子计算的标号。

② 定义裂纹信息。

计算应力强度因子时，ANSYS13.0 提供了类似 J 积分计算的方法来指定必需的裂尖节点组件和裂纹扩展方向信息，可以通过如下两种方法实现。

方法一，定义裂尖节点组件和裂纹平面法向量。对应命令为

```
CINT, CTNCOMP, par1, par2, par3
```

其中， $par1$  是裂尖节点组件的标号， $par2$  是裂纹扩展方向计算辅助节点（可以是裂纹张开面上的任意节点）， $par3$  是裂纹前缘上扩展方向扫过的终止节点。 $par2$  和  $par3$  的值用来指定裂纹扩展方向。尽管 ANSYS 可以自动计算裂尖的局部坐标系，但是最好通过  $par2$  来定义一个裂纹面上节点，从而使裂纹尖端节点的扩展方向保持一致。默认情况下，当裂尖节点触碰到了自由面时，ANSYS 程序通过外表面来决定裂纹扩展方向和法向。然而，也可以通过  $par3$  来自定义求解坐标系。

在定义裂尖节点组件后，可以通过 CINT 命令的 NORMAL 选项来定义裂纹面的法向。对应命令为

```
CINT, NORMAL, par1, par2
```

其中， $par1$  是坐标系标号， $par2$  是坐标系的坐标轴。

方法二，定义裂纹扩展节点组件和裂纹扩展方向。该方法与 J 积分计算方法相同。

**注意：**ANSYS 可以自动计算裂尖节点的局部坐标系，但是最好通过 NORMAL 选项来让裂尖所有节点的法向保持一致。

辅助裂尖场是基于裂纹扩展方向的。因此，为了保证应力强度因子计算的精度，一定要正确界定裂纹扩展的定义。建议将裂尖局部坐标系的  $x$  轴指定为裂纹扩展方向， $y$  轴指定为裂纹面或边的法向， $z$  轴指定为裂纹前缘的切向。局部坐标系必须连续穿过裂纹前缘上的所有节点。不连续的坐标系将导致应力强度因子计算的非路径依赖性和沿裂纹前缘应力强度因子分布的不规整行为。ANSYS 通过 CINT 命令的 CTNCOMP 选项定义一个裂纹面上节点来指定坐标系，或通过结合 NORMAL 选项来定义坐标系。

(3) 指定路径编号。

对应命令为

```
CINT, NCONTOUR, n
```

其中， $n$  为路径编号。对 3D 裂纹几何，裂纹前缘上的节点的积分路径是一致的。

(4) 定义裂纹对称性条件。

一般情况下，组合模式的裂纹不存在裂纹对称性条件。但当定义了一个裂纹对称性条件时，应力强度因子  $K_2$  和  $K_3$  都为零，且用于计算 I 型应力强度因子  $K_1$  的交叉积分法计算结果被放大了两倍。定义对称性条件对应命令为

```
CINT, SYMM, ON
```

(5) 指定输出控制。

与 J 积分计算一致。

## 2) 位移外推法

通过后处理器 POST1 的 KCALC 命令计算复合模型的应力强度因子  $K_1$ 、 $K_2$  和  $K_3$ ，GUI 操作路径：Main Menu→General Postproc→Nodal Calcs→Stress Int Factr。该命令只能适用于裂纹尖端区域为均匀的各向同性材料的线弹性问题。

使用位移外推法计算应力强度因子的步骤如下。

(1) 定义裂尖或裂纹前缘的局部坐标系。

局部坐标系的  $x$  轴必须是与裂纹面保持一致（3D 模型应垂直于裂纹前缘）， $y$  轴垂直于裂纹面，如图 7-6 所示。执行 KCALC 命令时，该坐标系必须是处于激活状态的模型坐标系（CSYS）和结果坐标系（RSYS）。常用的创建局部坐标系的命令有 LOCAL、CLOCAL、CS、CSKP 等，GUI 操作路径：Utility Menu→WorkPlane→Local Coordinate Systems→Create Local CS→At Specified Loc。

(2) 定义一条沿裂纹面的路径。

路径的第一个节点必须是裂尖位置的节点。对 1/2 裂纹模型而言，需要沿裂纹面再取两个节点；而对完整模型而言，应沿其上下裂纹面分别再取两个节点。具体的命令：PATH 或 PPATH，GUI 操作路径：Main Menu→General Postproc→Path Operations→Define Path。图 7-6 描述了 2D 裂纹模型的路径。



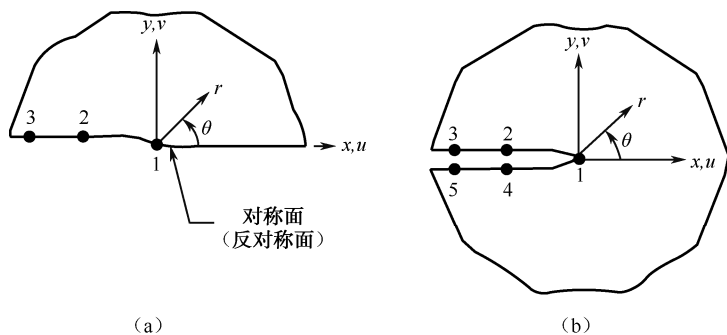


图 7-6 2D 裂纹模型应力强度因子计算路径

(3) 计算应力强度因子  $K_1$ ,  $K_2$  和  $K_3$ 。

通过 KCALC 命令的 KPLAN 选项指定模型的类型为平面应变或平面应力，包括对薄板的分析，应力靠近裂尖的渐进行为通常被认为是属于平面应变范畴。通过 KCSYM 选项可以指定模型的类别：带正对称边界条件的 1/2 模型、带反对称边界条件的 1/2 模型和整体模型。GUI 操作路径：Main Menu→General Postproc→Nodal Calcs→Stress Int Factr。

## 7.3 工程实例：线弹性断裂分析

通过前面对利用 ANSYS 进行断裂分析的简单介绍，再结合具体的实例来加深对断裂分析的理解。当外加应力在弹性范围内，且裂纹尖端的塑性区很小，满足小范围屈服条件时，这类断裂问题即为线弹性断裂力学问题。这一类裂纹问题通常出现在脆性材料中，如陶瓷、玻璃等的裂纹问题。对于该类问题的计算，通常采用 K 理论的方法。

### 7.3.1 问题描述

一个标准对称拉伸断裂试样（CT 试样），其初始裂纹为 30 mm，宽  $W$  为 50 mm，加载螺栓孔直径为 0.25 为  $W$ ，高为 1.2 为  $W$ ，厚度为 5 mm。材料属性为弹性模量为  $2.15 \times 10^{11}$  Pa，强化模量为 4022 MPa，泊松比为 0.3，比例极限为 860 MPa，抗拉强度为 978 MPa。试验加载的载荷为对称加载， $F = 1000$  N。

### 7.3.2 问题分析

由于 CT 试样厚度相对较薄，为了简化计算，根据弹性理论可知，该问题可近似成平面应力问题。且根据试样结构几何和加载的对称性，可以选择建立整体结构的 1/2 模型进行计算分析。由断裂力学理论可知，在裂尖区域存在应力集中导致的应力应变奇异现象，因此在该区域应进行网格细化或采用奇异性单元来保证模型的精度与正确性。此外，为了模拟真实实验加载，将  $Y$  方向合力均匀分布于螺栓孔上缘，这样避免了直接给孔顶点施加集中力带来的应力集中。

**注意：**ANSYS 计算时，应统一物理单位量纲，本例采用的长度、载荷和应力各物理量单位分别为 mm，N 和 Mpa。

### 7.3.3 求解步骤

#### 1. 建立工作文件名和工作标题

##### 1) 定义工作文件名

依次单击：Utility Menu→File→Change Jobname，弹出“Change Jobname”对话框。在“[/FILNAM] Enter new jobname”选项的输入栏中输入工作文件名“EX7-1”，勾选“New log and error files”选项的复选框，设置为“Yes”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流：

```
/FILNAME, EX7-1, 1
```

##### 2) 定义工作标题

依次单击：Utility Menu→File→Change Title，弹出“Change Title”对话框，在“[/TITLE] Enter new title”选项的输入栏中输入“The analysis of LEFM with CT specimen”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流：

```
/TITLE, The analysis of LEFM with CT specimen
```

#### 2. 定义单元类型

##### 1) 定义单元类型

依次单击：Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete，弹出“Element Types”拾取对话框，单击“Add...”按钮，弹出“Library of Element Types”对话框，在“Library of Element Types”选项的左列表框中选择“Structural→Solid”，右列表框中选择“Quad 8node 82”，在“Element Type reference number”选项的输入栏中输入“1”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

##### 2) 退出单元定义

单击“Element Types”对话框上的“Close”按钮，关闭该对话框。

对应命令流：

```
/PREP7  
ET, 1, PLANE82
```

#### 3. 定义材料性能参数

##### 1) 定义材料

依次单击：Main Menu→Preprocessor→Material Models，弹出“Define Material Model Behavior”对话框。

### 2) 定义塑性本构

在“Material Models Available”选项依次单击: Structural→Linear→Elastic→Isotropic, 弹出“Linear Isotropic Properties for Material Number 1”对话框, 在“EX”选项的输入栏中输入“2.1e11”, 在“PRXY”选项的输入栏中输入“0.3”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。然后继续依次单击: Structural→Nonlinear→Inelastic→Rate Independent→Isotropic Hardening Plasticity→Mises Plasticity→Bilinear, 弹出“Bilinear Isotropic Hardening for Material Number 1”对话框, 在“Yield Stss”选项的输入栏中输入“860”, 在“Tang Mod”选项的输入栏中输入“4022”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

### 3) 退出材料设置

在“Define Material Model Behavior”对话框中选择“Material→Exit”(或者直接单击右上角关闭按钮), 关闭该对话框, 退出材料属性设置。

对应命令流:

```
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,2.1e11
MPDATA,PRXY,1,,0.3
TB,BISO,1,1,2,
TBTEMP,0
TBDATA,,860,4022,,,
```

## 4. 建立几何模型、划分网格

### 1) 建立螺栓孔面

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Rectangle→By Dimensions, 弹出“Create Rectangle by Dimensions”对话框, 在“X1,X2 X-coordinates”选项的输入栏中分别输入“0”, “25”, 在“Y1,Y2 Y-coordinates”选项的输入栏中分别输入“30”, “15”, 单击“OK”按钮关闭该对话框, 即可生成上矩形面。

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Circle→Solid Circle, 弹出“Solid Circular Area”对话框, 在“WP X”选项的输入栏中输入“12.5”, “WP Y”选项的输入栏中输入“15”, 在“Radius”选项的输入栏中输入“6.25”, 单击“OK”按钮关闭该对话框, 生成圆面。

然后进行布尔运算, 依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Subtract→Areas, 弹出“Subtract Areas”拾取对话框, 在其输入栏中输入“1”, 单击“Apply”按钮。再次弹出“Subtract Areas”拾取对话框, 在其输入栏中输入“2”, 单击“OK”按钮关闭该对话框(也可在窗口中用鼠标先点取矩形图形, 单击“Apply”按钮, 再点取圆形图形, 单击“OK”按钮)。

最后重复以上步骤, 生成现有面的对称面。

对应命令流:

```
RECTNG,0,25,30,15
```

```

CYL4, 12.5, 15, 6.25
ASBA, 1, 2
RECTNG, 0, 25, 0, 15
CYL4, 12.5, 15, 6.25
ASBA, 1, 2

```

## 2) 建立右侧矩形面

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Rectangle→By Dimensions, 弹出“Create Rectangle by Dimensions”对话框, 在“X1,X2 X-coordinates”选项的输入栏中分别输入“25”, “30”, 在“Y1,Y2 Y-coordinates”选项的输入栏中分别输入“0”, “30”, 单击“Apply”按钮。再次弹出“Create Rectangle by Dimensions”对话框, 在“X1,X2 X-coordinates”选项的输入栏中分别输入“30”, “62.5”, 在“Y1,Y2 Y-coordinates”选项的输入栏中分别输入“0”, “30”, 单击“OK”按钮关闭对话框, 生成另一矩形面。

然后进行布尔运算, 依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Add→Areas, 弹出“Add Areas”拾取对话框, 在其输入栏中输入“3”, 单击“Apply”按钮。再次弹出“Add Areas”拾取对话框, 在其输入栏中输入“4”, 单击“OK”按钮关闭该对话框(也可在图形窗口中用鼠标拾取两个矩形面), 将右侧面合并成一个布尔面。

对应命令流:

```

RECTNG, 25, 30, 0, 30
RECTNG, 30, 62.5, 0, 30
AADD, 1, 2

```

## 3) 压缩编号

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Numbering Ctrls→Compress Numbers, 弹出“Compress Numbers”对话框, 在“Label Item to be compressed”选项的下拉列表中选择“ALL”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
NUMCMP, ALL
```

## 4) 设置单元网格种子

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Meshing→MeshTool, 弹出“MeshTool”对话框, 单击 Size Controls→Lines 选项后的“Set”按钮, 弹出“Elem Size on Picked Lines”拾取对话框, 拾取图形窗口中的几何边或在输入栏中输入对应边的编号“L1, L3, L5, L6, L13, L14, L17, L18, L19, L20”, 单击“Apply”按钮, 弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框, 在“No. of element divisions”选项的输入栏中输入“20”。单击“Apply”按钮退出该对话框, 重复该步骤对其他几何边设置网格种子, 将编号为“L12, L8”的边划分成 5 份, 其余的都划分成 10 份。

**注意:** 相邻边上的网格种子的数目一定要保持一致。

对应命令流:

```

LESIZE, 1, , , 20
LESIZE, 3, , , 20

```

```
LESIZE, 5, , , 20
LESIZE, 6, , , 20
LESIZE, 13, , , 20
LESIZE, 14, , , 20
LESIZE, 17, , , 20
LESIZE, 18, , , 20
LESIZE, 19, , , 20
LESIZE, 20, , , 20
LESIZE, 12, , , 5
LESIZE, 8, , , 5
LESIZE, 2, , , 10
LESIZE, 4, , , 10
LESIZE, 7, , , 10
LESIZE, 9, , , 10
LESIZE, 15, , , 10
LESIZE, 16, , , 10
```

#### 5) 创建奇异单元

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→Concentrat KPs→Create, 弹出“Concentrat Keypoint”拾取对话框, 在输入栏中输入裂尖关键点编号为“16”, 单击“OK”按钮, 弹出“Concentration Keypoint”对话框, 在“Radius of 1st row of elems”选项的输入栏中输入“0.5”, 在“Radius ratio (2nd row/1<sup>st</sup>)”选项的输入栏中输入“2”, 在“No of elems around circum”选项的输入栏中输入“20”, 在“midside node position”选项的下拉列表中选择“Skewed 1/4pt”, 单击“OK”按钮退出对话框, 完成设置。

对应命令流:

```
KSCON, 16, 0.5, 1, 20, 2
```

#### 6) 面网格划分

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Meshing→MeshTool, 弹出“MeshTool”对话框中, 在“Size Controls→Mesh”选项的下拉列表中选择“Areas”, 在“Shape”选项组中选择“Quad”和“Mapped”选项, 然后在其下拉列表中选择“Pick corners”。单击“Mesh”按钮, 弹出“Map Mesh Area by Corners”对话框, 用鼠标在图形窗口中点取编号为“A1”的面, 单击“Apply”按钮。然后在“Element size on Picked Areas”选项的输入栏中输入“1, 7, 5, 2”, 单击“Apply”按钮返回上一级对话框。采用同样的方法, 选择“A2”号面后, 在“Element size on Picked Areas”选项的输入栏中输入“11, 14, 12, 10”, 单击“OK”按钮完成对螺栓孔面网格划分。

接着, 更改“Shape”选项的复选框设置, 将“Mapped”选项改为“Free”选项, 单击“Mesh”按钮, 弹出“Mesh Areas”对话框, 用鼠标在图形窗口中单击编号为“A3”的面, 单击“OK”按钮。

最后消除重节点。依次单击: Main Menu→Preprocessor→Numbering Ctrl's→Merge Items, 弹出“Merge Coincident or Equivalently Defined Items”对话框, 在“Type of item to be merge”

对应命令流:

图 7-7 整个 CT 试样的有限元网格模型的示意图

## 5. 加载及求解

### 1) 定义求解类型

对应命令流:

```
/SOLU
ANTYPE, 0
```

## 2) 设置求解与输出选项

对应命令流:

```
NSUBST, 100, 0, 0
OUTPR, BASIC, ALL
```

### 3) 施加位移边界条件

依次单击: Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Lines, 弹出“Apply U,ROT on Nodes”拾取对话框, 在其输入栏中输入“19”(也可在图形窗口中用鼠标点取编号为“L19”的线), 单击“OK”按钮, 弹出“Apply U,ROT on Lines”对话框, 选择“UY”选项后, 单击“Apply”按钮关闭该对话框。再依次单击: Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes, 弹出“Apply U,ROT on Nodes”拾取对话框, 在其输入栏中输入“23”(也可在图形窗口中用鼠标点取节点“N23”), 单击“OK”按钮, 弹出“Apply U,ROT on Nodes”对话框, 选择“UX”选项, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
DL, 19, , UY, 0
D, 23, , , , UX
```

### 4) 施加载荷边界条件

首先依次单击: Utility Menu→Select→Entities, 弹出“Select Entities”对话框, 在第一个下拉列表中选择“Lines”选项, 在第二个下拉列表中选择“By Num/Pick”选项, 并选中“From Full”选项, 单击“OK”按钮关闭对话框, 进入“Select lines”对话框, 通过鼠标在图形窗口中拾取编号为“L5, L6”的线(螺栓孔上缘)或在输入栏中输入“5,6”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

然后, 再依次单击: Utility Menu→Select→Entities, 弹出“Select Entities”对话框, 此时将第一个下拉列表更改为“Nodes”选项, 第二个下拉列表更改为“Attached to”选项, 且选中“Lines, all”与“Reselect”选项, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

最后依次单击: Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Force/Moment→On Nodes, 弹出“Apply F/M on Nodes”拾取对话框, 单击“Pick All”按钮关闭该拾取对话框, 弹出“Apply F/M on Nodes”对话框, 在“Direction of Force/mom”选项的下拉列表中选择“UY”选项, 并在“Force/moment value”选项的输入栏中输入“80”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
LSEL, S, , , 5, 6
NSLL, R, 1
F, ALL, FY, 80
```

### 5) 求解

依次单击: Main Menu→Solution→Solve→Current LS, 弹出“/STATUS Command”文本框及“Solve Current Load Step”对话框, 浏览完毕文本框后单击“Close”按钮退出。单击“Solve Current Load Step”对话框上的“OK”按钮, ANSYS 开始求解计算, 求解完成后, 弹出“Note”对话框, 单击“Close”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
SOLVE
FINISH
```

## 6. 进入一般后处理模块，查看结果

### 1) 查看变形图

依次单击: Main Menu→General Postproc→Plot Results→Deformed Shape, 弹出“Plot Deformed Shape”对话框, 选择“Def+undeformed”选项, 单击“OK”按钮关闭该对话框。显示结构变形图, 保留未变形结构轮廓, 如图 7-8 所示。

### 2) 显示结构等效应力云图

依次单击: Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu, 弹出“Contour Nodal Solution Data”对话框, 依次单击: Nodal Solution→Stress→von Mises stress, 单击“OK”按钮。显示结构等效应力云图, 如图 7-9 所示。

对应命令流:

```
/POST1
PLDISP, 2
PLNSOL, S, EQV, 0, 1
```

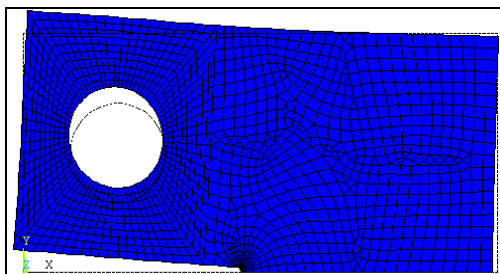


图 7-8 图形显示结构变形结果示意图

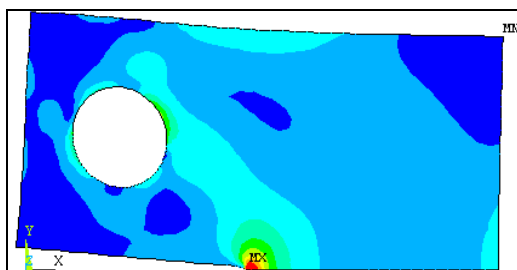


图 7-9 图形显示结构等效应力云图

### 3) 计算断裂应力强度因子

首先, 依次单击: Utility Menu→WorkPlane→Local Coordinate Systems→Create Local CS→At Specified Loc, 弹出“Creat CS at Location”拾取对话框, 选中“Global Cartesian”选项, 通过鼠标在图形窗口中选中编号为“16”的关键点, 单击“OK”按钮关闭对话框, 弹出“Create Local CS at Specified Location”对话框, 在“Ref number of new coord sys”选项的输入栏中输入坐标系编号“11”, 在“Type of coordinate system”选项的下拉列表中选择“Cartesian 0”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

**注意:** 自定义坐标系编号应是大于等于 11 的一个整数。

对应命令流:

```
LOCAL, 11, 0, 30, 0, 0, , , 1, 1
```

然后, 定义一个沿裂纹面的积分路径。依次单击: Main Menu→General Postproc→Path Operations→Define Path→By Nodes, 弹出“By Nodes”拾取对话框, 在其输入栏中输入节点编号“2603,2789,1323”, 单击“OK”按钮关闭对话框, 进入“By Nodes”对话框, 在“Define Path Name”选项的输入栏中输入路径的名称为“Path”, 单击“OK”按钮关闭对话框完成路径设置。



**注意：**路径上的第一个节点一定是裂尖节点，对于对称模型需要裂纹面上另外两个点，而整体模型还需要对应裂纹面上的两个点。

对应命令流：

```
FLST, 2, 3, 1
FITEM, 2, 2603
FITEM, 2, 2789
FITEM, 2, 1323
PATH, path, 3, 30, 20
PPATH, P51X, 1
```

最后计算应力强度因子值。依次单击：Main Menu→General Postproc→Nodal Calcs→Stress Int Factr，弹出“Stress Intensity Factor”对话框，在“Disp extrapolat based on”选项的下拉列表中选择“Plane stress”，在“Model Type”选项的下拉列表中选择“Half-symm b.c.”，单击“OK”按钮关闭该对话框完成设置，弹出“KCALC Command”文本框，计算结果如图 7-10 所示。

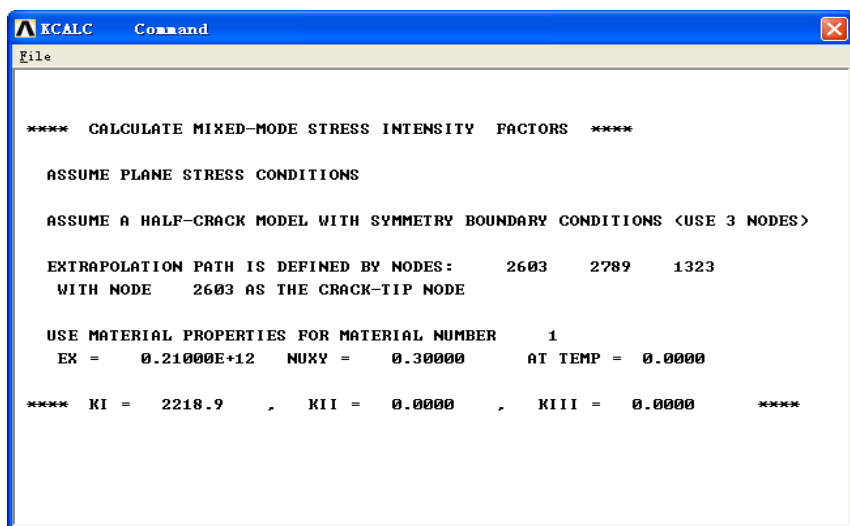


图 7-10 “KCALC Command” 文本框

对应命令流：

```
KCALC, 1, 1, 0, 0
```

### 7.3.4 CT 试样断裂应力强度因子计算分析完整命令流

FINISH	!退出以前模块
/CLEAR, START	!清除系统中所有数据，读入启动文件设置
! (1) 建立工作文件名和工作标题	
/FILENAME, EX7-1, 1	!设置工作文件名 EX7-1
/TITLE, The analysis of LEFM with CT specimen	!设置工作标题

! (2) 定义单元类型

/PREP7

ET, 1, PLANE82

! (3) 定义材料性能参数

MPTEMP, , , , , , , ,

MPTEMP, 1, 0

MPDATA, EX, 1, , 2.1e11

MPDATA, PRXY, 1, , 0.3

TB, BISO, 1, 1, 2,

TBTEMP, 0

TBDATA, , 860, 4022, , , ,

! (4) 建立几何模型、划分网格

RECTNG, 0, 25, 30, 15

CYL4, 12.5, 15, 6.25

ASBA, 1, 2

RECTNG, 0, 25, 0, 15

CYL4, 12.5, 15, 6.25

ASBA, 1, 2

RECTNG, 25, 30, 0, 30

RECTNG, 30, 62.5, 0, 30

AADD, 1, 2

NUMCMP, ALL

LESIZE, 1, , , 20

LESIZE, 3, , , 20

LESIZE, 5, , , 20

LESIZE, 6, , , 20

LESIZE, 13, , , 20

LESIZE, 14, , , 20

LESIZE, 17, , , 20

LESIZE, 18, , , 20

LESIZE, 19, , , 20

LESIZE, 20, , , 20

LESIZE, 12, , , 5

LESIZE, 8, , , 5

LESIZE, 2, , , 10

LESIZE, 4, , , 10

LESIZE, 7, , , 10

LESIZE, 9, , , 10

LESIZE, 15, , , 10

LESIZE, 16, , , 10

KSCON, 16, 0.5, 1, 20, 2

MSHKEY, 1

AMAP, 1, 1, 7, 5, 2

AMAP, 2, 11, 14, 12, 10

! 进入前处理模块

! 设置单元类型

! 设置材料参考温度

! 设置材料弹性模量 210Gpa

! 设置材料泊松比为 0.3

! 设置材料强化模型

! 设置材料参考温度

! 设置材料屈服极限与强化模量

! 建立一个矩形面 A1

! 建立一个圆面 A2

! 布尔差运算, 从 A1 面中减去 A2 面得到 A3 面

! 建立一个矩形面 A1

! 建立一个圆面 A2

! 布尔差运算, 从 A1 面中减去 A2 面得到 A4 面

! 建立一个矩形面 A1

! 建立一个矩形面 A2

! 布尔和运算, 将 A1 面和 A2 面合并成 A3 面

! 对所有元素重新编号

! 将 L1 线划分成 20 份

! 将 L3 线划分成 20 份

! 将 L5 线划分成 20 份

! 将 L6 线划分成 20 份

! 将 L13 线划分成 20 份

! 将 L14 线划分成 20 份

! 将 L17 线划分成 20 份

! 将 L18 线划分成 20 份

! 将 L19 线划分成 20 份

! 将 L20 线划分成 20 份

! 将 L12 线划分成 5 份

! 将 L8 线划分成 5 份

! 将 L2 线划分成 10 份

! 将 L4 线划分成 10 份

! 将 L7 线划分成 10 份

! 将 L9 线划分成 10 份

! 将 L15 线划分成 10 份

! 将 L16 线划分成 10 份

! 在关键点 16 附近设置奇异性单元

! 选择扫略网格划分方式

! 对面 1 进行扫略网格划分

! 对面 2 进行扫略网格划分

MSHKEY, 0	!选择自由网格划分方式
AMESH, 3	!对面 3 进行自由网格划分
NUMMRG, All	!合并所有元素
FINISH	!退出前处理模块
! (5) 加载及求解	
/SOLU	!进入求解模块
ANTYPE, 0	!定义结构分析类型为静力分析
NSUBST, 100, 0, 0	!定义 100 个载荷子步
OUTPR, BASIC, ALL	!在输出结果中, 列出所有载荷步计算结果
DL, 19, , UY, 0	!给线段 19 施加 Y 方向的位移约束
D, 23, , , , , UX	!给节点 23 施加 X 方向的位移约束
LSEL, S, , , 5, 6	!选择线 5 和线 6
NSLL, R, 1	!选择线上的所有节点
F, ALL, FY, 80	!施加 Y 方向的载荷
ALLSEL	!选择所有模型元素
SOLVE	!开始求解计算
FINISH	!退出求解模块
! (6) 进入一般后处理模块, 查看结果	
/POST1	!进入一般后处理模块
PLDISP, 2	!查看结构变形图
PLNSOL, S, EQV, 0, 1	!查看结构等效应力云图
LOCAL, 11, 0, 30, 0, 0, , , 1, 1	!自定义局部坐标系
FLST, 2, 3, 1	!指定鼠标选取节点
FITEM, 2, 2603	!积分路径上的第一个点
FITEM, 2, 2789	!积分路径上的第二个点
FITEM, 2, 1323	!积分路径上的第三个点
PATH, path, 3, 30, 20,	!设置积分路径信息
PPATH, P51X, 1	!定义积分路径
KCALC, 1, 1, 0, 0	!计算断裂应力强度因子 K
FINISH	!退出后处理模块 POST1

## 7.4 工程实例：弹塑性 J 积分计算

前面介绍的应力强度因子  $K$  的计算实例, 主要针对于脆性材料而言。而当材料具有一定的韧性, 且不满足裂尖塑性区尺寸  $r_y \leq 0.02a$  的小范围屈服条件时, 线弹性断裂力学的分析就失去一定的精确性。韧性材料裂纹扩展前会在裂尖出现明显的塑性区, 如工程应用中的中、低强度高韧钢含裂纹构件, 甚至高强钢中存在微小裂纹等诸如此类的大范围屈服问题。目前, 求解弹塑性断裂问题的参量主要以  $J$  和 COD 为主, 本节实例主要讲解如何利用 ANSYS 实现  $J$  积分的计算。

### 7.4.1 问题描述

一个中心裂纹板，其板中心孔边存在一初始裂纹为 12mm，板宽为 50mm，高为 150mm，厚度为 5mm。材料属性为弹性模量为  $2.10 \times 10^{11} \text{Pa}$ ，强化模量为 2022MPa，泊松比为 0.3，比例极限为 560MPa，抗拉强度为 1028MPa。试验加载的载荷为对称加载， $F=3000\text{N}$ 。

### 7.4.2 问题分析

由于中心裂纹板相对较薄，为了简化计算，根据弹性理论可知，该问题可近似成平面应力问题。而且根据试样结构几何和加载的中心对称性，可以选择建立整体结构的 1/4 模型进行计算分析。由断裂力学理论可知，在裂尖区域存在应力集中导致的应力应变奇异现象，因此在该区域应进行网格细化或采用奇异性单元来保证模型的精度与正确性。

**注意：**ANSYS 计算时，应统一物理单位量纲，本例采用的物理单位为 mm、N、MPa。

### 7.4.3 求解步骤

#### 1. 建立工作文件名和工作标题

##### 1) 定义工作文件名

依次单击：Utility Menu→File→Change Jobname，弹出“Change Jobname”对话框，在“[/FILNAM] Enter new jobname”选项的输入栏中输入工作文件名“EX7-2”，勾选“New log and error files”选项的复选框，设置为“Yes”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

##### 2) 定义工作标题

依次单击：Utility Menu→File→Change Title，弹出“Change Title”对话框，在“[/TITLE] Enter new title”选项的输入栏中输入“The analysis of JINT with MT specimen”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流：

```
/FILNAME, EX7-2, 1  
/TITLE, The analysis of JINT with MT specimen
```

#### 2. 给变量赋值

依次单击：Utility Menu→Parameters→Scalar Parameters，弹出“Scalar Parameters”对话框，在“Selection”选项的输入栏中输入“W=50”，单击“Accept”按钮完成变量  $W$  的赋值，以同样的方式对以下变量进行赋值：“B=5”、“tipsize=0.005”、“FF=6000”、“E=106875”、“ $\nu=0.299$ ”、“Sp02=902”、“E2=1032”、“Sb=966”、“A=12”，最后单击“Close”按钮关闭对话框。

对应命令流:

```
W=50  
B=5  
tipsize=0.005  
FF=6000  
E=106875  
v=0.299  
Sp02=902  
E2=1032  
Sb=966  
A=12
```

### 3. 定义单元类型, 设置材料参数

#### 1) 定义单元类型

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete, 弹出“Element Types”拾取对话框, 单击“Add...”按钮, 弹出“Library of Element Types”对话框, 在“Library of Element Types”选项的左列表框中选择“Structural→Solid”, 右列表框中选择“Quad 8node 82”, 在“Element Type reference number”选项的输入栏中输入“1”, 单击“OK”按钮返回至上一级拾取对话框。单击“Options”按钮, 弹出“PLANE82 element type options”对话框, 在“Element behavior”选项的下拉列表中选择“Plane strs w/thk”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

#### 2) 设置单元实常数

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Real Constant→Add/Edit/Delete, 弹出“Real Constants”拾取对话框, 单击“Add”按钮, 弹出“Real Constant Set Number 1, for PLANE2”对话框, 在“Thickness”选项的输入栏中输入“b”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

#### 3) 设置材料参数

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Material Models, 弹出“Define Material Model Behavior”对话框, 在“Material Models Available”选项中依次单击: Structural→Linear→Elastic→Isotropic, 弹出“Linear Isotropic Properties for Material Number 1”对话框, 在“EX”选项的输入栏中输入“E”, 在“PRXY”选项的输入栏中输入“v”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。然后继续依次单击: Structural→Nonlinear→Inelastic→Rate Independent→Isotropic Hardening Plasticity→Mises Plasticity→Bilinear, 弹出“Bilinear Isotropic Hardening for Material Number 1”对话框, 在“Yield Stss”选项的输入栏中输入“Sp02”, 在“Tang Mod”选项的输入栏中输入“E2”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

#### 4) 退出材料设置

在“Define Material Model Behavior”对话框中选择“Material→Exit”(或者直接单击右上角关闭按钮), 关闭该对话框, 退出材料属性设置。

对应命令流:

```
/PREP7
ET, 1, plane82
keyopt, 1, 3, 3
R, 1, B
MPTEMP, 1, 0
MPDATA, EX, 1, , E
MPDATA, PRXY, 1, , V
TB, BISO, 1, 1, 2,
TBTEMP, 0
TBDATA, , Sp02, E2, , , ,
```

#### 4. 建立几何模型

##### 1) 建立矩形面

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Rectangle→By 2 Corners, 弹出“Create Rectangle by 2 Corners”对话框, 在“WP X,WP Y,Width,Hight”, 选项的输入栏中输入“0,0.08\*w,a-4,2.92\*w”, 单击“Apply”按钮即可生成 A1 矩形面。继续重复在“WP X,WP Y,Width,Hight”选项的输入栏中分别输入“a-4,0.08\*w,8,2.92\*w”、“a+4,0.08\*w,w-a-4,2.92\*w”、“0,0,a-4,0.08\*w”和“a+4,0,w-a-4,0.08\*w”, 依次生成 A2、A3、A4 和 A5, 最后单击“OK”按钮关闭该对话框。

##### 2) 建立关键点

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→in Active CS, 弹出“Create Keypoints in Active Coordinate System”对话框, 在“Keypoint number”选项的输入栏中输入关键点编号“60”, 在“Location in active CS”选项的输入栏中输入“a,0”, 单击“Apply”按钮即生成 K60 号关键点。同理, 重复在“Keypoint number”选项的输入栏中输入关键点编号“61”、“62”和“63”, 在对应的“Location in active CS”选项的输入栏中分别输入“a+2,0”、“a-2,0”和“a,2”, 依次生成 K61、K62 和 K63 关键点, 最后单击“OK”按钮关闭该对话框。

##### 3) 建立几何线

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Creat→Lines→Lines→Straight Lines, 弹出“Creat Straight lines”拾取对话框, 在其输入栏中输入“60,61”, 单击“Apply”按钮生成直线 L21, 重复在其输入栏中输入“60,62”、“60,63”、“14,62”和“17,61”, 依次生成直线 L22、直线 L23、直线 L24 和直线 L25, 最后单击“OK”按钮关闭该对话框。

然后继续依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Creat→Arcs→By End KPs & Rad, 弹出“Arc by End KPs & Rad”拾取对话框, 在其输入栏中输入弧线端点编号“61,63”, 单击“OK”按钮, 接着在其输入栏中输入弧线点编号“60”, 单击“OK”按钮, 弹出“Arc by End KPs & Rad”对话框, 在“Radius of the arc”选项的输入栏中输入半径“2”, 单击“OK”按钮生成弧线 L26。重复在其输入栏中输入弧线端点编号“62,63”, 单击“OK”按钮, 接着在其输入栏中输入弧心点编号“60”, 单击“OK”按钮, 弹出“Arc by End KPs &

Rad”对话框，在“Radius of the arc”选项的输入栏中输入半径“2”，单击“OK”按钮生成弧线 L27。

#### 4) 建立几何面

依次单击：Main Menu→Preprocessor→Modeling→Creat→Areas→Arbitrary→By Lines，弹出“Creat Area by Lines”拾取对话框，在其输入栏中输入线编号“22,23,27”，单击“Apply”按钮生成面 A6。再次弹出“Creat Area by Lines”拾取对话框，在其输入栏中输入线编号“21,23,26”，单击“OK”按钮退出对话框生成面 A7。

然后依次单击：Main Menu→Preprocessor→Numbering Ctrls→Merge Items，弹出“Merge Coincident or Equivalently Defined Items”对话框，在“Type of item to be merge”选项的下拉列表中选择“ALL”，单击“OK”按钮关闭该对话框。消除重合的元素后，依次单击：Main Menu→Preprocessor→Modeling→Creat→Areas→Arbitrary→By Lines，弹出“Creat Area by Lines”拾取对话框，在其输入栏中输入线编号“14,5,20,25,26,27,24”，单击“OK”按钮生成面 A8。

最后进行布尔运算。依次单击：Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Add→Areas，弹出“Add Areas”拾取对话框，在其输入栏中输入“6”，单击“Apply”按钮，在其输入栏中输入“7”，单击“OK”按钮关闭该对话框（也可在图形窗口中用鼠标拾取两个矩形面）。将面 A6 和面 A7 合并成面 A9。

#### 5) 压缩编号

依次单击：Main Menu→Preprocessor→Numbering Ctrls→Compress Numbers，弹出“Compress Numbers”对话框，在“Label Item to be compressed”选项的下拉列表中选择“ALL”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流：

```
BLC4,0,0.08*w,a-4,2.92*w
BLC4,a-4,0.08*w,8,2.92*w
BLC4,a+4,0.08*w,w-a-4,2.92*w
BLC4,0,0,a-4,0.08*w
BLC4,a+4,0,w-a-4,0.08*w
k,60,a,0
k,61,a+2,0
k,62,a-2,0
k,63,a,2
LSTR,60,61
LSTR,60,62
LSTR,60,63
LSTR,14,62
LSTR,17,61
LARC,61,63,60,2,
LARC,62,63,60,2,
AL,22,23,27
AL,21,23,26
```

```

NUMMRG,ALL
AL,14,5,20,25,26,27,24
AADD,6,7
NUMCMP,ALL

```

## 5. 划分网格

### 1) 设置单元网格种子

依次单击：Main Menu→Preprocessor→Meshing→MeshTool，弹出“MeshTool”对话框，单击“Size Controls→Lines”选项后的“Set”按钮，弹出“Element Size on Picked Lines”拾取对话框，拾取图形窗口中的几何边，或在其输入栏中输入对应边的编号“2,4,6,8,9,10,14”，单击“Apply”按钮，弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，在“No. of element divisions”选项的输入栏中输入“40”。单击“Apply”按钮退出该对话框，重复该步骤对其他几何边设置网格种子，将编号为 L1, L3, L5, L7, L11, L12, L13, L15, L16, L17, L18 的边平均划分成 10 份。最后把 L19 和 L20 划分成 10 份，并且在“Element Sizes on Picked Lines”对话框中的“Spacing ratio”选项的输入栏中输入“0.5”，单击“OK”按钮退出对话框完成单元种子划分。

**注意：**相邻边上的网格种子的数目一定要保持一致。

对应命令流：

```

LESIZE, 2, , , 40
LESIZE, 4, , , 40
LESIZE, 6, , , 40
LESIZE, 8, , , 40
LESIZE, 9, , , 40
LESIZE, 10, , , 40
LESIZE, 14, , , 40
LESIZE, 1, , , 10
LESIZE, 3, , , 10
LESIZE, 5, , , 10
LESIZE, 7, , , 10
LESIZE, 11, , , 10
LESIZE, 12, , , 10
LESIZE, 13, , , 10
LESIZE, 15, , , 10
LESIZE, 16, , , 10
LESIZE, 17, , , 10
LESIZE, 18, , , 10
LESIZE, 19, , EVVK
E, 10, 0.5
LESIZE, 20, , , 10, 0.5

```

### 2) 创建奇异单元

依次单击：Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrl→Concentrat KPs→



Create, 弹出“Concentration Keypoint”拾取对话框, 在其输入栏中输入裂尖关键点编号“13”, 单击“OK”按钮, 弹出“Concentration Keypoint”对话框, 在“Radius of 1st row of elems”选项的输入栏中输入“tipsize”, 在“Radius ratio (2nd row/1st)”选项的输入栏中输入“1.02”, 在“No. of elems around circumf”选项的输入栏中输入“20”, 在“midside node position”选项的下拉列表中选择“Skewed 1/4pt”, 单击“OK”按钮退出该对话框, 完成设置。

对应命令流:

```
KSCON, 13, tipsize, 1, 20, 1.02
```

### 3) 面网格划分

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Meshing→MeshTool, 弹出“MeshTool”对话框, 在“Size Controls→Mesh”选项的下拉列表中选择“Areas”, 在“Shape”选项组中选择“Quad”和“Mapped”选项。单击“Mesh”按钮, 弹出“Mesh Areas”对话框, 用鼠标在图形窗口中拾取面 A1、面 A2、面 A3、面 A4 和面 A5, 单击该对话框上的“OK”按钮关闭对话框, 返回至上一级对话框。然后在“Shape”选项的下拉列表中选择“Pick corners”。单击“Mesh”按钮, 弹出“Map Mesh Area by Corners”对话框, 用鼠标在图形窗口中拾取面 A6, 单击“OK”按钮。然后在输入栏中输入“10,15,14,11”, 单击“OK”按钮完成对非裂尖区域面网格的划分。

其次, 更改“Shape”选项组中“Mapped”选项为“Free”选项, 单击“Mesh”按钮, 弹出“Mesh Areas”对话框, 用鼠标在图形窗口中拾取面 A7, 单击对话框上的“OK”按钮完成裂尖区域网格划分。

最后, 消除重节点并压缩节点编号。依次单击: Main Menu→Preprocessor→Numbering Ctrls→MergeItems, 弹出“Merge Coincident or Equivalently Defined Items”对话框, 在“Type of item to be merge”选项的下拉列表中选择“All”, 然后单击“OK”按钮确认选项设置, 弹出一个“Warning”对话框, 直接单击“OK”按钮即可。整个试样的有限元网格划分模型如图 7-11 所示。

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Numbering Ctrls→Compress Numbers, 弹出“Compress Numbers”对话框, 在“Label Item to be compressed”选项的下拉列表中选择“Nodes”, 单击“OK”按钮关闭该对话框完成节点重新编号。

对应命令流:

```
MSHKEY, 1  
AMESH, 1  
AMESH, 2  
AMESH, 3  
AMESH, 4  
AMESH, 5
```

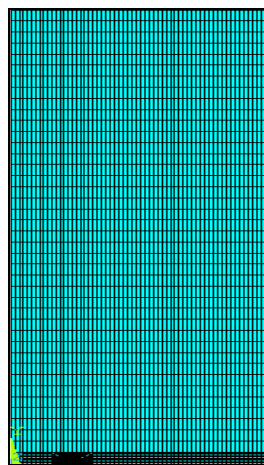


图 7-11 图形显示整个试样的有限元网格划分模型

```
AMAP, 6, 10, 15, 14, 11
MSHKEY, 0
AMESH, 7
NUMMRG, ALL
NUMCMP, Nodes
```

## 6. 加载及求解

### 1) 定义求解类型

依次单击：Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis，弹出“New Analysis”对话框，选择分析类型为“Static”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流：

```
/SOLU
ANTYPE, 0
```

### 2) 设置求解与输出选项

依次单击：Main Menu→Solution→Analysis Type→Sol'n Controls，弹出“Solution Controls”对话框，在“Write Items to Results File”选项组中选择“All solution items”选项（默认选项）。在“Analysis Options”选项组中选择“Small Displacement Static”选项（默认选项）。在“Time Control”选项组中选择“Number of substeps”选项，在“Number of substeps”选项的输入栏中输入载荷子步数为“100”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流：

```
NSUBST, 100, 0, 0
OUTPR, BASIC, ALL
```

### 3) 施加位移边界条件

依次单击：Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Lines，弹出“Apply U,ROT on Lines”拾取对话框，在其输入栏中输入“14,17,20”（也可在图形窗口中用鼠标点取编号为 L14、L17 和 L20 的线），单击“OK”按钮，弹出“Apply U,ROT on Lines”对话框，选择“UY”选项，单击“Apply”按钮关闭该对话框。再次弹出“Apply U,ROT on Lines”拾取对话框，在其输入栏中输入“4,13”，单击“OK”按钮，弹出“Apply U,ROT on Lines”对话框，选择“UX”选项，单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流：

```
DL,14,,UY,0
DL,17,,UY,0
DL,20,,UY,0
DL,4,,UX,0
DL,13,,UX,0
```

### 4) 施加载荷边界条件

首先依次单击：Utility Menu→Select→Entities，弹出“Select Entities”对话框，在第一个下拉列表中选择“Lines”选项，在第二个下拉列表中选择“By Num/Pick”选项，并选中

“From Full”选项，单击“OK”按钮关闭对话框。弹出“Select lines”对话框，通过鼠标在图形窗口中拾取编号为“L3,L7,L10”的线或在输入栏中输入“3,7,10”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

然后依次单击：Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Pressure→On Lines，弹出“Apply Pressure on Lines”拾取对话框，单击“Pick All”按钮关闭该拾取对话框，弹出“Apply Pressure on Lines”对话框，在“Load PRES value”选项的输入栏中输入“-ff/w”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流：

```
LSEL, S, , , 3
LSEL, A, , , 7
LSEL, A, , , 10
SFL, ALL, PRES, -ff/w
```

#### 5) 求解

依次单击：Main Menu→Solution→Solve→Current LS，弹出“/STATUS Command”文本框及“Solve Current Load Step”对话框，浏览完毕文本框后单击“File→Close”按钮退出。单击“Solve Current Load Step”对话框上的“OK”按钮，ANSYS 开始求解计算，求解完成后，弹出“Note”对话框，单击“Close”按钮关闭。

对应命令流：

```
ALLSEL
SOLVE
FINISH
```

### 7. 进入一般后处理模块，查看结果

#### 1) 查看变形图

依次单击：Main Menu→General Postproc→Plot Results→Deformed Shape，弹出“Plot Deformed Shape”对话框，选择“Def + undeformed”选项，单击“OK”按钮关闭该对话框。显示结构变形图，保留未变形结构轮廓，如图 7-12 所示。

#### 2) 显示结构等效应力云图

依次单击：Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu，弹出“Contour Nodal Solution Data”对话框，在“Item to be contoured”选项中依次单击：Nodal Solution→Stress→von Mises stress，单击“OK”按钮。显示结构等效应力云图，如图 7-13 所示。

对应命令流：

```
/POST1
PLDISP, 2
PLNSOL, S, EQV, 0, 1
```

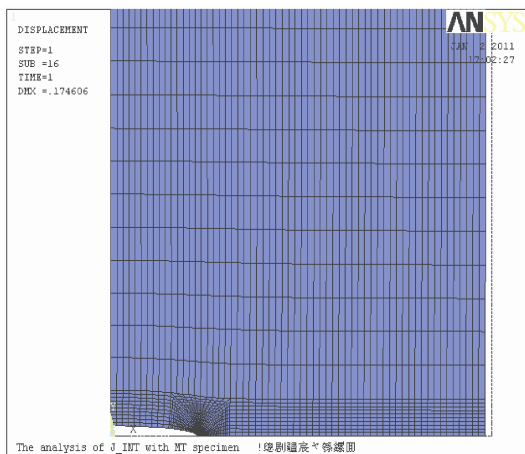


图 7-12 图形显示结构变形结果

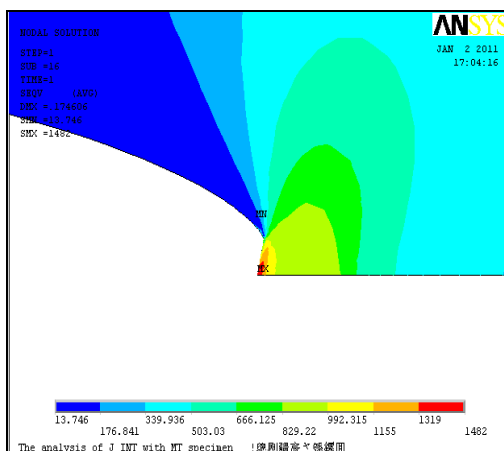


图 7-13 图形显示结构等效应力云图

## 8. 计算断裂 J 积分

### 1) 赋值计算

依次单击: Main Menu→General Postproc→Element Table→Define Table, 弹出“Element Table Data”拾取对话框, 单击“Add”按钮进入“Define Addition Element Table Items”对话框, 在“User label for item”选项的输入栏中输入“sene”, 并在“Item,Comp Results data item”选项组中选择“Energy→Strain enrg SENE”选项, 单击“OK”按钮, 将单元应变能赋值给变量 sene。采取同样的方式, 在“User label for item”选项的输入栏中输入“volu”, 并在“Item,Comp Results data item”选项组中选择“Geometry→Elem volume VOLU”选项, 单击“OK”按钮, 将单元体积赋值给变量 volu。

然后依次单击: Main Menu→General Postproc→Element Table→Exponentiate, 弹出“Exponentiate Element Table Items”对话框, 在“User label for result”选项的输入栏中输入变量“wi”, 在“Lab1”选项的下拉列表中选择“SENE”, 在“Lab2”选项的下拉列表中选择“VOLU”, 并在“EXP2”选项的输入栏中输入“-1”, 单击“OK”按钮完成单元应变能密度 wi 的赋值计算。

对应命令流:

```
ETABLE,sene,SENE,
ETABLE,volu,VOLU,
SEXP,Wi,SENE,VOLU,1,-1
```

### 2) 创建积分路径

依次单击: Main Menu→General Postproc→Path Operations→By Location, 弹出“By Location”对话框, 在“Name”选项的输入栏中输入变量“jint”, 在“nPts”选项的输入栏中输入“4”, 在“nSets”选项的输入栏中输入“50”, 在“nDiv”选项的输入栏中输入“40”, 单击“OK”按钮, 弹出“By Location in Global Cartesian”对话框, 在“NPT”选项的输入栏中输入路径上第一个点代号“1”, 并在“X,Y,Z Location in Global CS”选项的输入栏中

输入对应坐标“a+4, 0, 0”，单击“Apply”按钮继续定义其余三个路径点：(a+4, 0.08\*w, 0)、(a-4, 0.08\*w, 0)和(a-4, 0, 0)。最后单击“OK”按钮退出对话框完成积分路径设置。

**注意：**路径的方向必须是逆时针由X轴正向指向X轴负向。

对应命令流：

```
PATH,JINT,4,50,40
PPATH,1,0,a+4,0
PPATH,2,0,a+4,0.08*w
PPATH,3,0,a-4,0.08*w
PPATH,4,0,a-4,0
```

### 3) 应变能密度映射到路径上

依次单击：Main Menu→General Postproc→Path Operations→Map onto Path，弹出“Map Result Items onto Path”对话框，在“lab”选项的输入栏中输入“wi”，并在“Item,Comp item to be mapped”选项中选择“Elem table item→ETAB”选项，在输入栏中输入“ETAB,wi”，单击“OK”按钮完成将单元应变能密度映射到积分路径上。

其次，依次单击：Main Menu→General Postproc→Path Operations→Integrate，弹出“Integrate Path Items”对话框，在“LabR”选项的输入栏中输入变量“j”，在“Lab1”和“Lab2”选项的下拉列表中分别选择“Wi”和“YG”选项，单击“OK”按钮完成应变能密度“wi”沿积分路径积分得到“j”，即J积分第一项。

最后，依次单击：Utility Menu→Parameters→Get Scalar Data，弹出“Get Scalar Data”对话框，在“Type of data to be retrieved”选项的下拉列表中依次选择“Results data→Path operations”，单击“OK”按钮，弹出“Get Data from Path Operations”对话框，在“Name of parameter to be defined”选项的输入栏中输入变量“ji”，并在“Path item label”选项的下拉列表中选择“J”，且在“Path data to be retrieved”选项的下拉列表中选择“Last value LAST”，单击“OK”按钮退出该对话框。

对应命令流：

```
PDEF, Wi, ETAB, Wi
PCALC, INTG, j, Wi, YG
*GET, ji, PATH, , LAST, j
```

### 4) 清除积分路径上的非几何量

依次单击：Main Menu→General Postproc→Path Operations→Clear Path Items，弹出“Clear Non-geometry Path Items”对话框，单击“OK”按钮确认删除并关闭该对话框。

对应命令流：

```
PDEF, CLEAR
```

### 5) 定义路径单位法向量

依次单击：Main Menu→General Postproc→Path Operations→Unit Vector，弹出“Define Unite Vector”对话框，在“LabXR”、“LabYR”和“LabZR”选项的输入栏中分别输入“NX”、“NY”和“NZ”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
PVECT, NORM, NX, NY, NZ
```

#### 6) 将应力分量映射到路径上

依次单击: Main Menu→General Postproc→Path Operations→Map onto Path, 弹出“Map Result Items onto Path”对话框, 在“lab”选项的输入栏中输入“SX”, 并在“Item,Comp item to be mapped”选项组中选择“Stress→X-direction SX”选项, 单击“Apply”按钮。采取同样的方式, 在“lab”选项的输入栏中输入“SY”和“SXY”, 并相应地在“Item,Comp item to be mapped”选项组中选择“Stress→Y-direction SY”和“Stress→XY-direction SXY”选项, 单击“OK”按钮退出该对话框。

对应命令流:

```
PDEF, INTR, SX, SX
PDEF, INTR, SY, SY
PDEF, INTR, SXY, SXY
```

#### 7) 计算牵拉向量

依次单击: Main Menu→General Postproc→Path Operations→Multiply, 弹出“Multiply Path Items”对话框, 在“LabR”选项的输入栏中输入变量“TX1”, 并在“Lab1”和“Lab2”选项的下拉列表中分别选择“SX”和“NX”, 单击“Apply”按钮。采取同样的方式, 在“LabR”选项的输入栏中输入变量“TX2”, 并在“Lab1”和“Lab2”选项的下拉列表中分别选择“SXY”和“NY”, 单击“OK”按钮退出对话框。

然后依次单击: Main Menu→General Postproc→Path Operations→Add, 弹出“Add Path Items”对话框, 在“LabR”选项的输入栏中输入变量“TX”, 并在“Lab1”和“Lab2”选项的下拉列表中分别选择“TX1”和“TX2”, 单击“OK”按钮完成牵拉向量 TX 的计算, 退出该对话框。重复同样的步骤完成牵拉向量 TY 的计算。

**注意:**  $TX=TX1+TX2=SX*NX+SXY*NY$ ,  $TY=TY1+TY2=SXY*NX+SY*NY$ 。

对应命令流:

```
PCALC, MULT, TX1, SX, NX
PCALC, MULT, TX2, SXY, NY
PCALC, ADD, TX, TX1, TX2
PCALC, MULT, TY1, SXY, NX
PCALC, MULT, TY2, SY, NY
PCALC, ADD, TY, TY1, TY2
```

#### 8) 偏移积分路径

依次单击: Utility Menu→Parameters→Get Scalar Data, 弹出“Get Scalar Data”对话框, 在“Type of data to be retrieved”选项的下拉列表中选择“Results data→Path operations”, 单击“OK”按钮, 弹出“Get Data from Path Operations”对话框, 在“Name of parameter to be defined”选项的输入栏中输入变量“dx”, 并在“Path item label”选项组中选择“S”选项, 且在“Path data to be retrieved”选项的下拉列表中选择“Last value LAST”, 单击“OK”按钮将路径长度赋值给变量 dx 并退出该对话框。然后, 在命令窗口输入“DX=DX/100”, 单

击回车键后依次单击: Main Menu→General Postproc→Path Operations→Add, 弹出“Add Path Items”对话框, 在“LabR”选项的输入栏中输入变量“XG”, 并在“Lab1”选项的下拉列表中选择“XG”, 在“FACT2”选项的输入栏中输入“0”, 单击“OK”按钮完成路径左移  $DX/2$  距离的操作, 退出该对话框。

对应命令流:

```
*GET, dx, PATH, , LAST, S
DX=DX/100
```

#### 9) 将位移分量映射到新路径上

依次单击: Main Menu→General Postproc→Path Operations→Map onto Path, 弹出“Map Result Items onto Path”对话框, 在“lab”选项的输入栏中输入“ux1”, 并在“Item,Comp item to be mapped”选项组中选择“DOF solution→Translation UX”, 单击“Apply”按钮。采取同样的方式, 在“lab”选项的输入栏中输入“uy1”, 并相应地在“Item,Comp item to be mapped”选项组中选择“DOF solution→Translation UY”, 单击“OK”按钮退出该对话框。

对应命令流:

```
PCALC, ADD, XG, XG, , , -DX/2
PDEF, INTR, ux1, UX
PDEF, INTR, uy1, UY
```

#### 10) 重复偏移积分路径

参照以上 8) 和 9) 的步骤, 重复偏移积分路径, 如图 7-14 设置, 完成路径向右平移  $dx$  距离, 并将位移分量映射到新的路径上。如图 7-15 所示, 赋值给变量“ux2 和 uy2”。最后再将路径向左平移  $DX/2$  距离, 即回到初始路径位置。

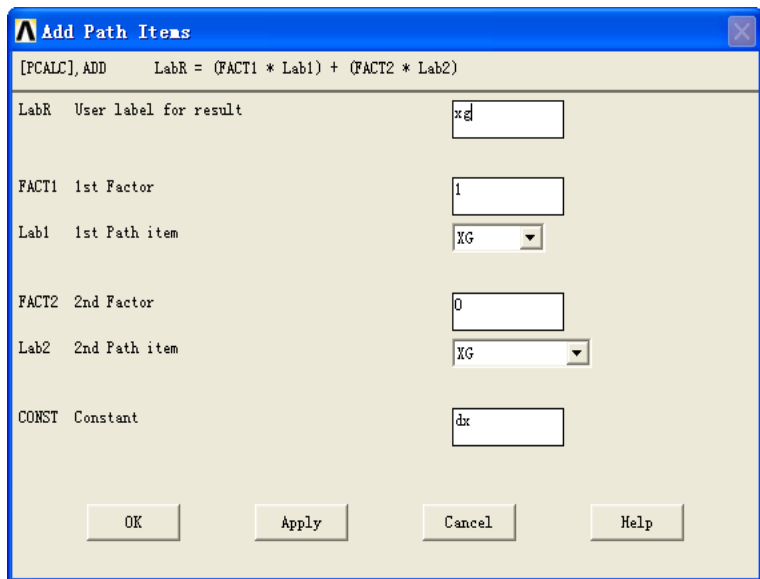


图 7-14 “Add Path Items”对话框

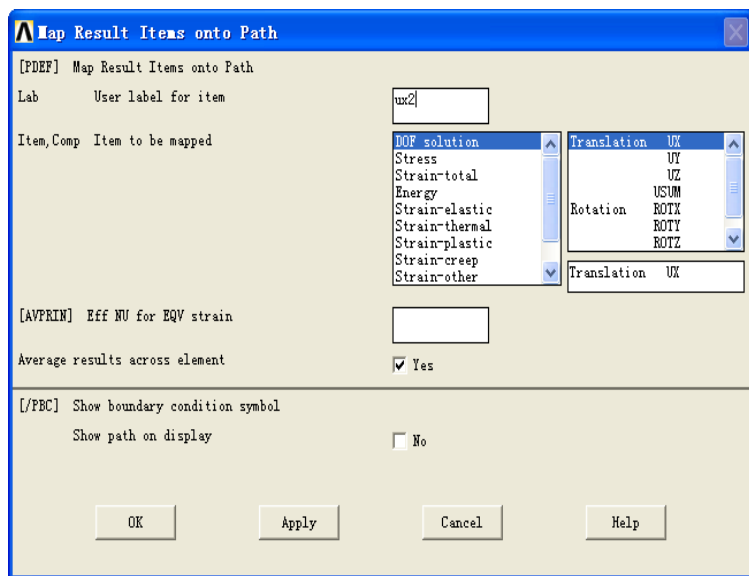


图 7-15 “Map Result Items onto Path”对话框

对应命令流:

```
PCALC, ADD, XG, XG, , , , DX
PDEF, INTR, ux2, UX
PDEF, INTR, uy2, UY
PCALC, ADD, XG, XG, , , , -DX/2
```

#### 11) 赋值计算

在命令窗口输入“DX=1/DX”，单击回车键后依次单击：Main Menu→General Postproc→Path Operations→Add，弹出“Add Path Items”对话框，在“LabR”选项的输入栏中输入变量“c1”，并在“Lab1”和“Lab2”选项的下拉列表中分别选择“UX2”和“UX1”，在“FACT1”和“FACT2”选项的输入栏中分别输入“DX”和“-DX”，单击“Apply”按钮。采取同样的方式，在“LabR”选项的输入栏中输入变量“c2”，并在“Lab1”和“Lab2”选项的下拉列表中分别选择“UY2”和“UY1”，在“FACT1”和“FACT2”选项的输入栏中分别输入“DX”和“-DX”，单击“OK”按钮退出该对话框。

**注意：** $C1=(UX2-UX1)/DX$ ， $C2=(UY2-UY1)/DX$ 。

然后，依次单击：Main Menu→General Postproc→Path Operations→Multiply，弹出“Multiply Path Items”对话框，在“LabR”选项的输入栏中输入变量“c1”，并在“Lab1”和“Lab2”选项的下拉列表中分别选择“C1”和“TX”，单击“Apply”按钮。采取同样的方式，在“LabR”选项的输入栏中输入变量“c2”，并在“Lab1”和“Lab2”选项的下拉列表中分别选择“C2”和“TY”，再单击“OK”按钮退出该对话框。

最后依次单击：Main Menu→General Postproc→Path Operations→Add，弹出“Add Path Items”对话框，在“LabR”选项的输入栏中输入变量“c”，并在“Lab1”和“Lab2”选项的下拉列表中分别选择“C1”和“C2”，单击“OK”按钮退出该对话框，完成变量C的计算。

**注意：** $C=C1+C2=TX*(UX2-UX1)/DX+TY*(UY2-UY1)/DX$ 。



对应命令流:

```
DX=1/DX
PCALC, ADD, c1, UX2, UX1, DX, -DX
PCALC, ADD, c2, UY2, UY1, DX, -DX
PCALC, MULT, c1, TX, C1
PCALC, MULT, c2, TY, C2
PCALC, ADD, c, C1, C2
```

#### 12) 计算 J 积分第二项

依次单击: Main Menu→General Postproc→Path Operations→Integrate, 弹出“Integrate Path Items”对话框, 在“LabR”选项的输入栏中输入变量“j”, 在“Lab1”和“Lab2”选项的下拉列表中分别选择“C”和“S”, 单击“OK”按钮, 完成变量 C 沿积分路径积分得到“j”, 此为 J 积分第二项。

然后, 依次单击: Utility Menu→Parameters→Get Scalar Data, 弹出“Get Scalar Data”对话框, 在“Type of data to be retrieved”选项的下拉列表中依次选择“Results data→Path operations”, 单击“OK”按钮, 弹出“Get Data from Path Operations”对话框, 在“Name of parameter to be defined”选项的输入栏中输入变量“jii”, 并在“Path item label”选项组中选择“J”选项, 且在“Path data to be retrieved”选项的下拉列表中选择“Last value LAST”, 单击“OK”按钮退出该对话框。

对应命令流:

```
PCALC, INTG, j, C, S
*GET, JII, PATH, , LAST, J
```

#### 13) 获得最终 J 积分

最后在命令流窗口中输入“JINT=(JII-JI)\*2”, 单击回车键后依次单击: Utility Menu→List→Status→Parameters→named parameter, 弹出“Named-Parameter Status”对话框, 在“Name of parameter”选项组中选择“JINT”选项, 单击“OK”按钮关闭该对话框, 弹出“\*STATUS Command”参数显示窗口。

对应命令流:

```
JINT=(JI-JII)*2
*STATUS, JINT
```

### 7.4.4 中心裂纹板断裂 J 积分计算分析完整命令流

FINISH	!退出以前模块
/CLEAR, START	!清除系统中所有数据, 读入启动文件设置
! (1) 建立工作文件名和工作标题	
/FILENAME, EX7-2, 1	!设置工作文件名 EX7-2
/TITLE, The analysis of JINT with MT specimen	!设置工作标题
! (2) 给变量赋值	

```

W=50
B=5
tipsize=0.005
FF=6000
E=106875
v=0.299
Sp02=902
E2=1032
Sb=966
A=12
! (3) 定义单元类型, 设置材料参数
/PREP7
ET, 1, plane82
keyopt, 1, 3, 3
R, 1, B
MPTEMP, 1, 0
MPDATA, EX, 1, , E
MPDATA, PRXY, 1, , V
TB, BISO, 1, 1, 2,
TBTEMP, 0
TBDATA, , Sp02, E2, , ,
! (4) 建立几何模型
BLC4, 0, 0.08*w, a-4, 2.92*w
BLC4, a-4, 0.08*w, 8, 2.92*w
BLC4, a+4, 0.08*w, w-a-4, 2.92*w
BLC4, 0, 0, a-4, 0.08*w
BLC4, a+4, 0, w-a-4, 0.08*w
k, 60, a, 0
k, 61, a+2, 0
k, 62, a-2, 0
k, 63, a, 2
LSTR, 60, 61
LSTR, 60, 62
LSTR, 60, 63
LSTR, 14, 62
LSTR, 17, 61
LARC, 61, 63, 60, 2,
LARC, 62, 63, 60, 2,
AL, 22, 23, 27
AL, 21, 23, 26
NUMMRG, ALL
AL, 14, 5, 20, 25, 26, 27, 24
AADD, 6, 7
NUMCMP, ALL
! 试样宽度变量
! 试样厚度变量
! 裂尖尺寸变量
! 载荷变量
! 材料弹性模量变量
! 泊松比变量
! 屈服强度变量
! 强化模量变量
! 极限强度变量
! 初始裂纹尺寸变量

! 设置单元类型
! 选择带厚度的平面应力单元
! 指定单元厚度实常数
! 设置材料常规性能参考温度
! 指定弹性模量
! 指定泊松比
! 设置双线性强化模型
! 设置材料强化性能参考温度
! 指定屈服强度和强化模量

! 通过指定角点和长宽尺寸建立矩形面

! 定义关键点 K60
! 定义关键点 K61
! 定义关键点 K62
! 定义关键点 K63
! 由关键点 K60 与 K61 生成一条直线
! 由关键点 K60 与 K62 生成一条直线
! 由关键点 K60 与 K63 生成一条直线
! 由关键点 K14 与 K62 生成一条直线
! 由关键点 K17 与 K61 生成一条直线
! 由关键点 K60, K61, K63 生成半径为 2 的弧线
! 由关键点 K60, K62, K63 生成半径为 2 的弧线
! 由线 L22、L23 和 L27 生成一个面
! 由线 L21、L23 和 L26 生成一个面
! 合并相同的元素
! 由线 L14, L5, L20, L25, L26, L27 和 L24 生成面
! 将面 A6、A7 合成一个面 A9
! 对所有元素进行重新编号

```

! (5) 划分网格

LESIZE, 2, , , 40

LESIZE, 4, , , 40

LESIZE, 6, , , 40

LESIZE, 8, , , 40

LESIZE, 9, , , 40

LESIZE, 10, , , 40

LESIZE, 14, , , 40

LESIZE, 1, , , 10

LESIZE, 3, , , 10

LESIZE, 5, , , 10

LESIZE, 7, , , 10

LESIZE, 11, , , 10

LESIZE, 12, , , 10

LESIZE, 13, , , 10

LESIZE, 15, , , 10

LESIZE, 16, , , 10

LESIZE, 17, , , 10

LESIZE, 18, , , 10

LESIZE, 19, , , 10, 0.5

LESIZE, 20, , , 10, 0.5

KSCON, 13, tipsize, 1, 20, 1.02

MSHKEY, 1

AMESH, 1

AMESH, 2

AMESH, 3

AMESH, 4

AMESH, 5

AMAP, 6, 10, 15, 14, 11

MSHKEY, 0

AMESH, 7

NUMMRG, ALL

NUMCMP, Nodes

FINISH

! (6) 加载及求解

/SOLU

ANTYPE, 0

NSUBST, 100, 0, 0

OUTPR, BASIC, ALL

DL, 14, , UY, 0

DL, 17, , UY, 0

DL, 20, , UY, 0

DL, 4, , UX, 0

DL, 13, , UX, 0

!将线 L2 划分成 40 份

!将线 L4 划分成 40 份

!将线 L6 划分成 40 份

!将线 L8 划分成 40 份

!将线 L9 划分成 40 份

!将线 L10 划分成 40 份

!将线 L14 划分成 40 份

!将线 L1 划分成 10 份

!将线 L3 划分成 10 份

!将线 L5 划分成 10 份

!将线 L7 划分成 10 份

!将线 L11 划分成 10 份

!将线 L12 划分成 10 份

!将线 L13 划分成 10 份

!将线 L15 划分成 10 份

!将线 L16 划分成 10 份

!将线 L17 划分成 10 份

!将线 L18 划分成 10 份

!将线 L19 划分成 10 份,且递减靠近裂尖点

!将线 L20 划分成 10 份,且递减靠近裂尖点

!在关键点 K13 处附近设置奇异性单元

!采用映射网格划分方式

!对面 A1~A6 进行映射网格划分

!采用自由网格划分方式

!对面 A7 进行自由网格划分

!合并相同的元素

!对节点进行重新编号

!退出前处理模块

!设置求解类型

!设置求解子步数

!给所选线 Y 方向上的位移约束

!给所选节点施加 X 方向的位移约束

```

LSEL, S, , , 3
LSEL, A, , , 7
LSEL, A, , , 10
SFL, ALL, PRES, -FF/W
ALLSEL
SOLVE
FINISH
! (7) 进入一般后处理模块, 查看结果
/POST1
PLDISP, 2
PLNSOL, S, EQV, 0, 1
! (8) 计算断裂 J 积分
ETABLE, sene, SENE,
ETABLE, volu, VOLU,
SEXP, Wi, SENE, VOLU, 1, -1
PATH, JINT, 4, 50, 40
PPATH, 1, 0, a+4, 0
PPATH, 2, 0, a+4, 0.08*w
PPATH, 3, 0, a-4, 0.08*w
PPATH, 4, 0, a-4, 0
PDEF, Wi, ETAB, Wi
PCALC, INTG, J, Wi, YG
*GET, JI, PATH, , LAST, J
PDEF, CLEAR
PVECT, NORM, NX, NY, NZ
PDEF, INTR, SX, SY
PDEF, INTR, SXY, SXY
PCALC, MULT, TX1, SX, NX
PCALC, MULT, TX2, SXY, NY
PCALC, ADD, TX, TX1, tx2
PCALC, MULT, TY1, SXY, NX
PCALC, MULT, TY2, SY, NY
PCALC, ADD, TY, TY1, TY2
*GET, DX, PATH, , LAST, S
DX=DX/100
PCALC, ADD, XG, XG, , , -DX/2
PDEF, INTR, UX1, UX
PDEF, INTR, UY1, UY
PCALC, ADD, XG, XG, , , DX
PDEF, INTR, UX2, UX
PDEF, INTR, UY2, UY
PCALC, ADD, XG, XG, , , -DX/2
DX=1/DX

```

!选择线 L3、L7 和 L10

!给所选线施加 Y 轴正方向的拉力

!选择所有元素

!开始求解计算

!退出求解模块

!进入一般后处理模块

!查看结构变形图

!查看结构等效应力云图

!将单元应变能赋值给变量 sene

!将单元体积赋值给变量 volu

!计算单元应变能密度并赋值给变量 Wi

!通过 4 个节点定义积分路径

!路径上的第一个节点

!路径上的第二个节点

!路径上的第三个节点

!路径上的第四个节点

!将单元应变能密度映射 Wi 到积分路径上

!将应变能密度 Wi 沿 Y 轴积分, 赋值给变量 J

!将积分结果赋给变量 JI, 即为 J 积分的第一项

!删除路径几何特征外的所有路径信息

!定义 J 积分路径的单位法向量

!应力分量 SX、SY 和 SXY 映射到积分路径上

!计算 TX1=SX\*NX

!计算 TX2=SXY\*NY

!计算沿 X 轴的牵拉向量 TX=TX1+TX2

!计算 TY1=SXY\*NX

!计算 TY2=SY\*NY

!计算沿 Y 轴的牵拉向量 TY=TY1+TY2

!将积分路径的长度赋值给变量 DX

!将积分路径沿 X 轴负向移动 DX/2 的距离

!将位移分量 UX 和 UY 映射到新积分路径上

!将积分路径沿 X 轴正向移动 DX 的距离

!将位移分量 UX 和 UY 映射到新积分路径上

!再将路径移动至初始的位置

PCALC, ADD, C1, UX2, UX1, DX, - DX	!计算变量 C1=(UX2-UX1)/DX
PCALC, ADD, C2, UY2, UY1, DX, - DX	!计算变量 C2=(UY2-UY1)/DX
PCALC, MULT, C1, TX, C1	!计算变量 C1=C1*TX
PCALC, MULT, C2, TY, C2	!计算变量 C2=C2*TY
PCALC, ADD, C, C1, C2	!计算变量 C=C1+C2
PCALC, INTG, J, C, S	!将变量 C 沿路径进行积分并赋值给变量 J
*GET, JII, PATH, , LAST, J	!将积分结果赋值给 JII,即 J 积分第二项
JINT=2*(JI-JII)	!计算 J 积分值
*STATUS, JINT	
FINISH	!退出一般后处理模块

## 本章小结

本章主要介绍了断裂力学分析基本过程,包括建立几何模型和网格划分,加载求解,以及断裂参数计算分析。详细介绍了断裂参数  $K$ 、 $J$  和  $G$  的理论背景,以及 ANSYS 里面如何计算应力强度因子和  $J$  积分的详细过程,并且分别给出了常见断裂力学分析实例。

通过本章的学习,掌握 ANSYS 里断裂力学分析时需要用到的奇异单元的设置,加深断裂力学理论的理解,熟悉 ANSYS 断裂力学分析的具体过程,并进一步加强有限元分析过程中几何建模、网格划分、加载求解,以及结果分析的能力。

## 思考题

- (1) 断裂力学参数分析基本过程包括哪几个阶段?
- (2) 对比本章其余实例,其分析步骤中哪些地方是相同的,哪些地方是不同的,区别在哪里?
- (3) 如何实现裂纹尖端的有效模拟?
- (4) 断裂力学参数  $K$  和  $J$  之间的关系是什么?

## 常见疑难问题解析

在本章的实例操作过程中,或者在做其他 ANSYS 练习可能会遇到的一些问题,结合本章,汇总如下。

- (1) ANSYS 模拟断裂裂纹尖端问题时如何反应裂尖应力应变奇异问题?

在进行断裂力学问题模拟分析时,对于裂纹尖端的正确模拟是极其关键的!为了反应裂尖应力应变奇异的现象,通常采用两种方法:一种方法是尽可能地将裂尖区域的单元网格划分得小,其带来的问题就是求解需要的时间太长;另一种方法是基于有限元理论可以将裂尖

单元设置为奇异单元，既能正确反应实际裂尖，也能有效进行模拟分析！

（2）为了正确求解到断裂参数  $J$  积分，应该如何选择积分路径？

根据  $J$  积分的定义可知，积分路径应该是由裂纹面任意点出发，沿逆时针方向（由  $x$  轴正向指向  $y$  轴正向）绕过裂尖而止于对应的另一裂纹表面。此外， $J$  积分路径应尽量远离裂尖区域。

（3）计算应力强度因子时，路径选择需要注意什么？

这里需要强调的一点就是，进行  $K$  因子计算时，路径的第一个点必须是裂尖点，这样才能计算出正确的值。



## 第 8 章 优 化 设 计



### 知识点

- 优化设计概述
- 优化设计分析基本步骤

### 8.1 优化设计概述

结构分析和结构优化是结构设计中的两个不同的层次和阶段。结构分析是结构优化的基础，为结构优化提供必要的的数据。随着工程技术的发展和经济社会的进步，工程设计人员越来越重视产品的结构性能和经济效益，而优化设计是实现这一目的的有效手段。

#### 8.1.1 什么是优化设计

优化设计技术是一种寻找最优设计方案的技术。最优设计是指既能保证产品具有良好的使用性能，又使产品的自重最轻（或体积最小）的现代设计方法，使产品耗材最少，成本最低，具有最佳的经济效益和社会效益。一般来说，产品的任何方面都是可以优化的。常用的优化范畴有形貌优化、拓扑优化、尺寸优化、形状优化等。

ANSYS 程序提供了两种适用于绝大多数优化问题的优化方法：零阶方法和一阶方法。其中一阶方法基于目标函数对设计变量的灵敏度分析，因此适合于比较精确的优化分析。

对于这两种方法，其实质就是一系列的分析—评估—修正的迭代过程，基于初始设计的分析结果就设计要求进行评估，然后修正设计。通过往复迭代直到所有的设计要求都满足为止。因此，ANSYS 程序需要通过指定随机优化分析的迭代次数来提高优化效率。

#### 8.1.2 基本概念

在 ANSYS 的优化设计中包含的基本定义有设计变量、状态变量、目标函数、合理和不合理的设计、分析文件、迭代、循环，以及设计序列等。其中设计变量、状态变量和目标函数总称为优化变量。如图 8-1 所示的梁结构优化设计为例，找出以下约束条件下矩形截面梁

的最小质量：总应力  $\sigma$  不超过  $\sigma_{\max}$  ( $\sigma \leq \sigma_{\max}$ )，梁的变形  $\delta$  不超过  $\delta_{\max}$  ( $\delta \leq \delta_{\max}$ )，梁的高度  $h$  不超过  $h_{\max}$  ( $h \leq h_{\max}$ )。

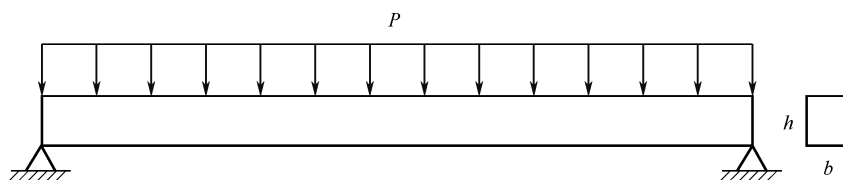


图 8-1 梁结构的优化设计示例

## 1. 设计变量

设计变量(DVs)为自变量，常常为结构的长度、厚度、直径等表征设计的可选参数。通过取定设计变量的上、下限来定义设计变量的变化范围。例如，在本例中，设计变量很显然应取为梁的宽度  $b$  和高度  $h$ 。由于它们都不可能小于零，因此其下限取为  $b > 0$ ， $h > 0$ ，同时  $h$  有上限  $h_{\max}$ 。在 ANSYS 程序中，最多允许定义 60 个设计变量。

## 2. 状态变量

状态变量(SVs)是约束设计的数值，常常为应力、温度、热流率、频率及变形等。它们是因变量，是设计变量的函数。状态变量可能会有上、下限，也可能只有单方面的限制，即只有上限或只有下限。在本例中有两个状态变量： $\sigma$  (总应力)和  $\delta$  (梁的变形)。在 ANSYS 优化程序中用户可以定义不超过 100 个状态变量。

## 3. 目标函数

目标函数是要求尽量减小的数值。它必须是设计变量的函数，即改变设计变量的数值将改变目标函数的数值。在本例中，梁的总重量就是目标函数。在 ANSYS 优化程序中，只能设定一个目标函数，且必须为正。

## 4. 设计序列

设计序列指的是确定一个特定模型的参数的集合。它是由优化变量的数值来确定的，但所有的模型参数（包括不是优化变量的参数）组成了一个设计序列。

## 5. 合理的设计

合理的设计应该满足所有给定的约束条件（包括设计变量的约束和状态变量的约束），而最优设计是指既能满足所有给定的约束条件，又能得到最小目标函数值的设计。如果所有的设计序列都不合理，则认为最优设计趋近于合理的设计，而不考虑目标函数的数值。

## 6. 分析文件

分析文件是指一个 ANSYS 程序的命令流输入文件，是一个完整的分析过程（包括前处理、求解、后处理）。它必须含有一个参数化的模型，也就是说用参数定义的模型，并指出



设计变量、状态变量和目标函数。由分析文件还可以自动生成优化循环文件（Jobname.loop），并在优化计算中循环处理。

## 7. 循环

一次循环是指一个分析周期（执行一次分析文件），最后一次循环的输出数据存储在文件 Jobname.opo 中。

## 8. 优化迭代

优化迭代（迭代过程）是指产生新的设计序列的一次或多次循环。一般情况下，一次迭代等同于一次循环，但对于一阶方法，一次迭代则代表多次循环。

# 8.2 优化设计分析基本步骤

ANSYS 优化设计一般通过命令流和 GUI 交互方式两种方法实现。这两种方法的选择取决于用户对于 ANSYS 程序 APDL 语言的熟悉程度和对 GUI 交互方式的习惯程度。

如果用户对于 ANSYS 程序的 APDL 语言相当熟悉，就可以选择输入整个优化文件的命令流来进行优化。对于复杂且计算耗时的分析任务来说（如非线性），这种方法效率更高。而 GUI 交互方式灵活性较大，可以实时看到循环过程的结果。使用 GUI 交互方式进行优化首先要建立模型的分析文件，然后优化模块所提供的功能都可以交互式的使用以确定设计空间，便于后续优化处理的进行。这些初期的交互式操作可以帮助用户提高优化效率。

优化设计通常包括如下几个步骤。

（1）生成分析文件：参数化建立模型（PREP7），求解（SOLUTION），提取并设置状态变量和目标函数（POST1/POST26）。

（2）建立与分析文件中变量相对应的参数，但该步骤不是必须的。

（3）进入优化模块，指定分析文件。

（4）指定优化变量。

（5）选择优化工具或方法。

（6）指定优化循环控制方式。

（7）执行优化分析。

（8）查看设计序列结果（OPT）和后处理（POST1/POST26）。

## 8.2.1 生成分析文件

ANSYS 程序运用分析文件构造循环文件进行优化迭代。分析文件中可以包括 ANSYS 提供的全部分析类型，如结构、热和流体、电磁等，线性或非线性等。

**注意：**ANSYS/LS-DYNA 的显式分析不能进行优化。

在分析文件中，模型的建立必须是参数化的（一般指优化变量为参数），结果也必须用

参数提取（用于状态变量和目标函数），优化设计中只能用数值参数。

用户的任务是建立分析文件并保证其正确性。分析文件应当覆盖整个分析过程并且是简练的，不必要的语句（如完成图形显示功能和列表功能的语句等）应当省略。只需将在交互过程中希望看到的显示（EPLODL）包含在分析文件中或者将其定位到一个显示文件中（/SHOW）。注意分析文件是要多次反复执行的，与优化分析本身无关的命令都会不必要的耗费机时，降低优化效率。

建立分析文件有两种方法：①用系统编辑器逐行输入；②交互式地完成分析，将 ANSYS 的 LOG 文件作为基础建立分析文件。这两种方式各有优缺点。方法①使得用户可以通过命令输入完整地控制参数化定义，也可以省去删除多余命令的麻烦。但是，如果对于 ANSYS 程序语言不熟悉，这种方法较为不便。而方法②则相对容易一些。但是，在最后生成分析文件的过程中，LOG 文件需要做较大的修改才能适合优化分析。这两种方法生成的分析文件需要包括的内容都是一样的。建立分析文件的步骤如下所述。

### 1. 参数化建立模型

用设计变量作为参数建立模型的工作是在 PREP7 中完成的。在上述梁结构的优化设计示例中设计变量为  $B$ （梁的宽度）和  $H$ （梁的高度），因此单元的实参由  $B$  和  $H$  来表示。

对应命令流：

...	!定义文件名、标题等
/PREP7	!初始化设计变量
B=2.0	
H=3.0	
ET, 1, BEAM3	!2D 梁单元
AREA=B*H	!梁的横截面面积
IZZ=(B*(H**3))/12	!绕 $z$ 轴的转动惯量
R, 1, AREA, IZZ, H	!以设计变量表示的单元实参
	!模型的其他部分
MP, EX, 1, 30e6	!杨氏模量
N, 1	!节点
N, 11, 120	
FILL	
E, 1, 2	!单元
EGEN, 10, 1, -1	
FINISH	!退出 PREP7
...	

前面提到，可以优化设计任何方面的唯一要求就是将其参数化。

设计变量（如  $B$  和  $H$ ）可以在程序的任何部分初始化，一般是在 PREP7 中定义。这些变量的初值只是在设计计算的初期用到，在优化循环过程中会被改变。

如果用 GUI 模式完成输入，可能会遇到直接拾取（picking）的操作。有些拾取操作是不允许参数化输入的。因此，应当避免在定义设计变量、状态变量和目标函数时使用这些操作，可以采用参数化的操作来代替。

## 2. 求解

求解器用于定义分析类型和分析选项、施加载荷、指定载荷步、完成有限元计算。分析中所用到的数据都要指出：凝聚法分析中的主自由度、非线性分析中的收敛准则、谐波分析中的频率范围等，载荷和边界条件也可以作为设计变量。例如，在本例中，**SOLUTION** 部分的命令流大致如下：

```
...
/SOLU
ANTYPE, STATIC                !静力分析（默认）
D, 1, UX, 0, , 11, 10, UY     !UX=UY=0, 梁两端节点固定
SFBEAM, ALL, 1, PRES, 100     !施加压力
SOLVE
FINISH                        !退出 SOLUTION
```

这一步骤不仅仅限于一次分析过程，如可以先进行热分析再进行应力分析（在热应力计算中）。

## 3. 参数化提取结果

在此步骤中提取结果并赋值给相应的参数。这些参数一般为状态变量和目标函数。提取数据的操作用\*GET 命令（GUI 操作路径：Utility Menu→Parameters→Get Scalar Data）来实现。通常用 POST1 来完成本步操作，特别是涉及数据的存储、加减或其他操作。

在本例中，梁的总质量是目标函数。因为质量与体积成比例（假定密度是均匀的），那么减小总体积就相当于减小总质量。因此，可以选择总体积为目标函数，状态变量选择为总应力和位移。这些参数对应的命令流为：

```
...
/POST1
SET, ...
NSORT, U, Y                    !以 UY 为基准对节点排序
*GET, DMAX, SORT, , MAX        !参数 DMAX=最大位移线单元的推导数值
                                !由 ETABLE 得出
ETABLE, VOLU, VOLU             !VOLU=每个单元的体积
ETABLE, SMAX_I, NMISC, 1       !SMAX_I=每个单元 I 节点处应力的最大值
ETABLE, SMAX_J, NMISC, 3       !SMAX_J=每个单元 J 节点处应力的最大值
SSUM                           !将单元表中每列的数据相加
*GET, VOLUME, SSUM, , ITEM, VOLU
                                !参数 VOLUME=总体积
ESORT, ETAB, SMAX_I, , 1       !按照单元 SMAX_I 的绝对值大小排序
*GET, SMAXI, SORT, , MAX       !参数 SMAXI=SMAX_I 的最大值
ESORT, ETAB, SMAX_J, , 1       !按照单元 SMAX_J 的绝对值大小排序
*GET, SMAXJ, SORT, , MAX       !参数 SMAXJ=SMAX_J 的最大值
SMAX=SMAXI/SMAXJ               !参数 SMAX=最大应力值
```

FINISH

...

#### 4. 准备分析文件

如果是用系统编辑器编辑的批处理文件，则简单存盘进入第 2 步即可；如果用交互方式建模，则必须在交互环境下数据库命令流文件或程序命令流文件生成分析文件。

(1) 数据库命令流文件，可以通过 LGWRITE 命令（GUI 操作路径：Utility Menu→File→WriteDB Log File）生成命令流文件。LGWRITE 将数据库内部的命令流写到文件 Jobname.LGW 中。内部命令流包含了生成当前模型所用的所有命令。

(2) 程序命令流文件，Jobname.LOG 包含了交互方式下用户输入的所有命令。如果用 Jobname.LOG 作为分析文件时，用户必须用系统编辑器删除文件中所有不必要的命令。因为交互方式下所有的操作都记录在 LOG 文件中，编辑工作会比较烦琐。而且，如果分析是在几个过程中完成的，就必须将几个 LOG 文件合在一起编辑生成一个完整的分析文件。

### 8.2.2 建立优化过程中的参数

在完成分析文件的建立后，就可以开始优化分析了（如果是在系统中建立的分析文件的话，就要重新进入 ANSYS）。如果在交互方式进行优化的话，最好（但不是必须）从分析文件中建立参数到 ANSYS 数据库中来（在批处理方式下除外）。

做这一步有两个好处。初始参数值可能作为一阶方法的起点，而且，对于各种优化过程来说，参数在数据库中可以在 GUI 交互方式下进行操作，便于定义优化变量。建立数据库参数可以选择下列任意一种方法。

(1) 读入与分析文件相关联的数据库文件（Jobname.DB），可以在 ANSYS 中建立整个模型的数据库。

GUI 操作路径：

Utility Menu→File→Resume Jobname.db

或 Utility Menu→File→Resume from

命令：RESUME

(2) 将分析文件直接读入 ANSYS 进行整体分析。这样将重新建立整个数据库，但对于大模型来说要耗费大量的机时。

GUI 操作路径：

Utility Menu→File→Resume from

命令：/INPUT

(3) 仅从存储的参数文件中读取参数到 ANSYS 中，采用如下操作来存储参数。

GUI 操作路径：

Utility Menu→Parameters→Save Parameters

命令：PARSAV

(4) 重新定义分析文件中存在的参数。不过,这样做需要知道分析文件中定义了哪些参数。

GUI 操作路径:

Utility Menu→Paramters→Scalar Parameters

命令: \*SET or "="

可以选择使用以上任意一种方式,然后用 OPVAR 命令(GUI 操作路径: Main Menu→Design Opt→Design Variables)来指定优化变量(参见 8.2.4 节)。

在优化过程中,ANSYS 数据库不一定要同分析文件一致。模型的输入是在优化循环过程中由分析文件中自动读取的。

### 8.2.3 进入 OPT, 指定分析文件(OPT)

该步骤是由 OPT 模块来实现的。首次进入优化模块时 ANSYS 数据库中的所有参数自动作为设计序列“1”。

GUI 操作路径:

Main Menu→Design Opt

命令: /OPT

在 GUI 交互方式下,用户必须指定分析文件名。这个文件用于生成优化循环文件 Jobname.LOOP。

GUI 操作路径:

Main Menu→Design Opt→Assign

命令: OPANL

批处理方式下分析文件通常是批命令流的第一部分,从文件的第一行到命令/OPT 第一次出现。默认的分析文件名是 Jobname. BAT (它是一个临时性的文件,是批处理输入文件的一个复制),因此在批处理方式下通常不用指定分析文件名。如果出于某种考虑将批文件分成两个部分(一个用于分析,另一个用于整个优化分析),则需要在进入优化模块后指定分析文件(OPANL)。

在分析文件中/PREP7 和/OPT 命令必须出现在其所在行的第一个非零字符处(不允许诸如\$等符号出现在这些命令行中)。这一点在生成优化循环文件时很关键。

### 8.2.4 声明优化变量

声明优化变量是指定哪些参数是设计变量,哪些参数是状态变量,哪些参数是目标函数。ANSYS 程序最多允许 60 个设计变量和最多允许 100 个状态变量,但只能有一个目标函数。

GUI 操作路径:

Main Menu→Design Opt→Design Variables

Main Menu→Design Opt→State Variables

Main Menu→Design Opt→Objective

命令: OPVAR

设计变量和状态变量需要定义最大值和最小值，而目标函数不需要给定范围。每个变量都有一个公差值，这个公差值既可以由用户定义，也可以选择由程序计算得出。

**注意：**如果 OPVAR 命令定义的优化变量名不存在，ANSYS 将自动定义这个变量，并赋初始值为零。

用户还可以随时方便地通过重新定义参数的方法来改变已定义的参数或删除一个优化变量（OPVAR, Name, DEL），这种删除操作并不是真正的删除这个参数，而是不将它继续当作优化变量而已。

## 8.2.5 选择优化工具或优化方法

ANSYS 程序默认的优化方法是单次循环，指定后续优化的工具和方法如下。

GUI 操作路径：

Main Menu→Design Opt→Method→Tool

命令：OPTYPE

### 1. ANSYS 优化方法

ANSYS 程序有两种优化方法是可用的，零阶方法和一阶方法。除此之外，用户可以提供外部的优化算法替代 ANSYS 自身的优化方法。在使用任何一种方法之前，必须先定义目标函数。

#### 1) 零阶方法（直接法）

顾名思义，零阶方法只用到因变量而不用到它的偏导数。由于目标函数和状态变量都是使用逼近的，因此优化设计和逼近数值具有同样的精确度。该方法是通用的方法，可以有效地处理绝大多数的工程问题。

#### 2) 一阶方法（间接法）

一阶方法，即使用因变量的一阶偏导数。该方法精度较高，尤其是在因变量变化很大，而且设计空间也相对较大时。但是，精度高并不能保证最佳求解，同时所消耗的机时也较多。

#### 3) 用户提供的优化算法

用户提供的优化算法可用外部过程（USEROP）替代 ANSYS 优化工具，也可通过 USEROP 过程将自己的方法和工具补充到 ANSYS 中。

### 2. ANSYS 优化工具

优化工具是搜索和处理设计空间的技术。由于获取最小值不一定是优化的最终目标，所以目标函数在使用这些优化工具时可以不指出。但是，必须要指定优化设计变量。ANSYS 程序可用的优化工具有以下几种。

#### 1) 单步运行法

只实现一次循环，求出一个 FEA 解。于是可以通过一系列的单次循环，每次求解前设定不同的设计变量来研究目标函数与设计变量的变化关系。

2) 随机搜索法

进行多次循环，每次循环设计变量随机变化。用户能够指定最大循环次数和期望的合理解数目。该工具可用来研究整个设计空间，并为以后的优化分析提供合理解。

3) 等步长搜索法

以一个参考设计序列为起点，然后生成几个设计序列。它按照单一步长在每次计算后，将设计变量在变化范围内进行改变。对于目标函数和状态变量的整体变化评估可以用该工具来实现。

4) 乘子计算法

这是一个统计工具，用来生成由各种设计变量极限值组成的设计序列。该工具主要目标是计算目标函数和状态变量的关系和相互影响。

5) 最优梯度法

对用户指定的参考设计序列，本工具计算目标函数和状态变量对设计变量的梯度，本工具可以进行局部的灵敏度分析。

6) 用户提供的优化工具

用户也可以通过外部过程（USEROP）将自己的方法和工具补充进去。

8.2.6 指定优化循环控制方式

每种优化方法和工具都有相应的循环控制参数，如最大迭代次数等。所有这些控制参数的设定都在同一个路径下，采用 GUI 操作路径来实现。

GUI 操作路径：  
Main Menu→Design Opt→Method→Tool

1. 设定控制参数

(1) 对于设定零阶方法的控制参数。

命令：OPSUBP  
和命令：OPEQN

(2) 对于设定一阶方法的控制参数。

命令：OPFRST

(3) 对于设定随机搜索法的控制参数。

命令：OPRAND

(4) 对于设定等步长搜索法的控制参数。

命令：OPSWEEP

(5) 对于设定乘子计算法的控制参数。

命令：OPFACT

(6) 对于设定最优梯度法的控制参数。

命令: OPGRAD

(7) 对于设定用户优化工具的控制参数。

命令: OPUSER

## 2. 设定优化过程中数据的存储方法

(1) 指定优化数据的存储文件名（默认为 Jobname.opt）。

GUI 操作路径:

Main Menu→Design Opt→Controls

命令: OPDATA

(2) 激活详细结果的输出。

GUT 操作路径:

Main Menu→Design Opt→Controls

命令: OPPRNT

(3) 存储最佳设计系列的数据。

GUI 操作路径:

Main Menu→Design Opt→Controls

命令: OPKEEP

用户还可以控制几个循环特性, 包括如何在循环中读取分析文件(默认是从第一行读取, 可以选择从第一个/PREP7 出现的位置开始读取); 设定为优化变量的参数可以忽略, 也可以在循环中处理。而且, 用户可以指定循环中存储哪种变量: 只存储数值变量还是存储数值变量和数组变量。该功能可以在循环中控制参数数值(包括设计变量和非设计变量)。

GUI 操作路径:

Main Menu→Design Opt→Controls

命令: OPLOOP

OPLOOP 命令中的 Parms 变量控制在循环中存储哪个参数。在循环中存储数值变量和数组变量的选项在一般情况下不需要设置, 除非是数组变量在分析文件以外定义, 而在循环中需要保存的情况。

## 8.2.7 进行优化分析

用下列方法开始优化分析。

GUI 操作路径:

MainMenu→Design Opt→Controls

命令: OPEXE

在执行 OPEXE 时, 优化循环文件(Jobname.LOOP)会根据分析文件生成。这个循环文



件对用户是透明的，并在分析循环中使用。循环在收敛、中断（不收敛，但达到最大循环次数或最大不合理解数）、分析中完成。

如果由于模型的问题（如网格划分有问题，非线性求解不收敛，与设计变量数值冲突等）导致循环中断时，优化处理器将进行下一次循环。如果是在 GUI 交互方式下进行的，程序将显示一个警告信息，并询问是否继续循环。如果是在批处理方式下，循环则自动继续。NCNV 命令（GVI 操作路径：Main Menu→Solution→Nonlinear→Criteria to Stop）是控制非线性分析的，在优化循环中被忽略。尽管中断循环的设计序列是存盘的，但参数的数据有可能非常大，与实际情况不相符。

所有优化变量和其他参数在每次迭代后将存储在优化数据文件（Jobname.OPT）中，最多可以保存 130 组这样的序列。如果超过了 130 组，那么其中数据最“不好”的序列将被删除。

如图 8-1 所示梁结构为例，优化部分的命令流大致如下：

/OPT	! 进入优化处理器
OPENL, ...	!分析文件名（批处理方式不需要）
	!指定优化变量
OPVAR, B, DV, 5, 16.5	!B 和 H 为设计变量
OPVAR, H, DV, 5, 8	
OPVAR, DMAX, SV, -0.1, 0	!DMAX 和 SMAX 为状态变量
OPVAR, SMAX, SV, 0, 20000	
OPTYPE, SUBP	!零阶方法
OPSUBP, 30	!最大迭代次数
OPEXE	!开始优化循环

不同的优化过程可以系列完成，如在零阶方法的分析结束后执行等步长搜索。使用以下命令对最佳设计序列执行等步长搜索：

OPTYPE, SWEEP	!扫描评估工具
OPSWEEP, BEST, 5	!最佳设计序列每个设计变量 5 次评估
OPEXE	!开始优化循环

## 8.2.8 查看设计序列结果

优化循环结束后可以使用下面的命令或相应的 GUI 操作路径来查看设计序列。这些命令适用于任何优化方法和工具生成的结果。

### 1) 命令：OPLIST

GUI 操作路径：
Main Menu→Design Opt→List

通过列出指定序列号的参数值，可以选择列出所有参数的数值，也可以只列出优化变量。

### 2) 命令：PLVAROPT

GUI 操作路径：
-----------

Main Menu→Design Opt→Graphs→Tables

通过用图显示指定的参数随序列号的变化，可以看出变量是如何随迭代过程变化的。

### 3) 命令: XVAROPT

GUI 操作路径:

Main Menu→Design Opt→Graphs→Tables

将图的  $x$  轴由序列号换成其他参数，对于 PLVAROPT 和 PRVAROPT 操作，设计序列将自动按照 XVAROPT 中的参数按升序排列。

(4) 对于等步长搜索法，乘子计算法和最优梯度法的一些特别的查看结果的方法。

① 等步长搜索法：用 OPRSW 命令列出结果，用 OPLSW 命令图示结果。

② 乘子算法：用 OPRFA 命令列出结果，用 OPLFA 命令图示结果。

③ 最优梯度法：用 OPRGR 命令列出结果，用 OPLGR 命令图示结果。

使用 STATUS 命令（GUI 操作路径：Main Menu→Design Opt→Status）可得到关于当前优化任务的信息，如分析文件名、优化技术、设计序列数及优化变量等。该命令还可以方便地查看优化环境，验证需要的设定是否全部输入优化处理器。

除查看优化数据外，用户可能希望用 POST1 或 POST26 对分析结果进行后处理。默认情况下，最后一个设计序列的结果存储在文件 Jobname.rst（或.rth 等，视分析类型而定）中。在循环运行前将“OPKEEP”选项设置为“ON”，最佳设计序列的数据也将保存在数据库和结果文件中。最佳结果和最佳数据库分别保存在 Jobname.brs（.brth）和 Jobname.db 文件中。

## 8.3 工程实例：矩形截面梁的结构优化

矩形截面是工程实际中一个常见的结构，是最简单的工程结构之一。在这里，对一矩形截面梁结构进行优化设计。

### 8.3.1 问题描述

设一矩形截面悬臂梁，左端为固定端，右端为自由端。梁长度为 6m，截面梁宽为 60cm。在梁的自由端承受竖直向下的集中载荷为 100kN。材料性能参数：弹性模量为  $2 \times 10^{11}$ Pa，泊松比为 0.3。

梁的高度为优化设计变量，要求梁高不低于 20cm 且不超过 80cm。优化状态变量为梁在载荷作用下产生的 Misses 应力不超过 50MPa。设计的目标是梁重最轻。

### 8.3.2 问题分析

该问题属于结构的静力分析问题。由于只需对梁高进行优化设计，因此可以转化为平面问题考虑。对梁高进行参数化定义，设置梁高初始值为 50cm。优化设计目标是梁重最轻，即可转换为梁的体积最小。

### 8.3.3 求解步骤

#### 1. 建立工作文件名和工作标题

##### 1) 定义工作文件名

依次单击: Utility Menu→File→Change Jobname, 弹出“Change Jobname”对话框, 在“[/FILNAM] Enter new jobname”选项的输入栏中输入工作文件名“EX8-1”, 勾选“New log and error files”选项的复选框, 设置为“Yes”, 然后单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
/FILNAME, EX8-1
```

##### 2) 定义工作标题

依次单击: Utility Menu→File→Change Title, 弹出“Change Title”对话框, 在“[/TITLE] Enter new title”选项的输入栏中输入“Shape Design of Beam”, 单击“OK”按钮。

对应命令流:

```
/TITLE, Shape Design of Beam
```

#### 2. 定义单元类型及实常数

##### 1) 定义单元类型

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete, 弹出“Element Types”拾取对话框。单击“Add”按钮, 弹出“Library of Element Types”对话框, 在“Library of Element Types”选项的左列表框中选择“Structural Solid”, 右列表框中选择“Quad 4node 42”, 在“Element Type reference number”选项的输入栏中输入“1”, 单击“OK”按钮关闭该拾取对话框。

##### 2) 设置平板厚度

单击“Element Types”拾取对话框中“Options”按钮, 弹出“PLANE42 element type options”对话框, 在“Element behavior K3”选项的下拉列表中选择“Plane strs w/thk”。单击“OK”按钮关闭该对话框。

##### 3) 退出单元定义

单击“Element Types”拾取对话框中的“Close”按钮关闭该拾取对话框。

对应命令流:

```
ET, 1, PLANE42, , , 3
```

##### 4) 定义实常数

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Real Constants→Add/Edit/Delete, 弹出“Real Constants”拾取对话框, 单击“Add...”按钮, 弹出“Element Type for Real Constants”对话框, 单击“OK”按钮, 弹出“Real Constant Set Number 1, for PLANE42”对话框, 在“AREA”选项的输入栏中输入“0.6”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。单击“Close”按钮关闭该对话框。

话框，退出实常数设置。

对应命令流：

```
R, 1, 0.6
```

### 3. 定义材料性能参数

依次单击：Main Menu→Preprocessor→Material Models，弹出“Define Material Model Behavior”对话框。在“Material Models Available”选项中依次单击：“Structural→Linear→Elastic→Isotropic”选项，弹出“Linear Isotropic Properties for Material Number 1”对话框，在“EX”选项的输入栏中输入“2e11”，在“PRXY”选项的输入栏中输入“0.3”，单击“OK”按钮关闭该对话框。在“Define Material Model Behavior”对话框中依次单击：Material→Exit 关闭该对话框。

对应命令流：

```
MP, EX, 1, 200e9
MP, NUXY, 1, 0.3
```

### 4. 建立几何模型、划分网格

#### 1) 参数化定义变量

依次单击：Utility Menu→Parameters→Scalar Parameters，弹出“Scalar Parameters”对话框，在“Selection”选项的输入栏中输入“H1=0.5”，单击“Accept”按钮。采取同样的方式，在“Selection”选项的输入栏中输入“H2=0.5”和“H3=0.5”。最后单击“Close”按钮关闭该对话框。

对应命令流：

```
H1=0.5
H2=0.5
H3=0.5
```

#### 2) 生成关键点

依次单击：Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→In Active CS，弹出“Create Keypoints in Active Coordinate System”对话框，参见表 8-1 完成关键点位置参数设置。

表 8-1 关键点参数设置一览表

关键点号	1	2	3	4	5	6
X 坐标	0	3	6	0	3	6
Y 坐标	0	0	0	-H1	-H2	-H3

对应命令流：

```
K, 1, 0, 0
K, 2, 3, 0
K, 3, 6, 0
```

```
K, 4, 0, -H1
```

```
K, 5, 3, -H2
```

```
K, 6, 6, -H3
```

### 3) 生成直线

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Create→Lines→Lines→Straight Line, 弹出“Create Straight Line”对话框, 在图形窗口中选取关键点 1 和关键点 2, 单击“Apply”按钮。再在图形窗口中选取关键点 2 和关键点 3, 单击“Apply”按钮。再在图形窗口中选取关键点 1 和关键点 4, 单击“Apply”按钮。再在图形窗口中选取关键点 3 和关键点 6, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
L, 1, 2
```

```
L, 2, 3
```

```
L, 1, 4
```

```
L, 3, 6
```

### 4) 生成样条曲线

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Splines→Spline thru KPs, 弹出“B-Spline”拾取对话框, 在其输入栏中输入“4,5,6”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
SPLINE,4,5,6,,,,,,1,0,0
```

### 5) 生成面

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Creat→Areas→Arbitrary→Through KPs, 弹出“Create Area thru KPs”拾取对话框, 在其输入栏中输入“1,2,5,4”, 单击“Apply”按钮。采取同样的方式, 在其输入栏中输入“2,3,6,5”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
A, 1, 2, 5, 4
```

```
A, 2, 3, 6, 5
```

### 6) 定义单元划分尺寸

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Global→Size, 弹出“Global Element Sizes”对话框, 在“SIZE Element edge length”选项的输入栏中输入“0.1”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
ESIZE, 0.1
```

### 7) 划分单元

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Areas→Mapped→3 or 4 sided, 弹出“Mesh Areas”拾取对话框, 在其输入栏中输入“ALL”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

AMESH, ALL

## 5. 加载求解

### 1) 定义分析类型

依次单击: Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis, 弹出“New Analysis”对话框, 选择分析类型为“Static”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

ANTYPE, STATIC

### 2) 选择输出结果

依次单击: Main Menu→Solution→Analysis Type→Sol'n Controls, 弹出“Solution Controls”对话框, 在“Write Items to Results File”选项的下拉列表中选择“All solution items”。单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

OUTPR, BASIC, ALL

### 3) 定义节点约束

依次单击: Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes, 弹出“Apply U,ROT on Nodes”对话框, 在其输入栏中输入“1,70,69,68, 67,37”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。弹出“Apply U,ROT on Nodes”拾取对话框, 在“DOFs to be constrained”选项的下拉列表中选择“All DOF”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

D, 1, ALL  
D, 70, ALL  
D, 69, ALL  
D, 68, ALL  
D, 67, ALL  
D, 37, ALL

### 4) 定义载荷

依次单击: Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Force/Moment→On Nodes, 弹出“Apply F/M on Nodes”拾取对话框, 在其输入栏中输入“187”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。弹出“Apply F/M on Nodes”对话框, 在“Lab Direction of force/mom”选项的下拉列表中选择“FY”, 在“VALUE Force/moment value”选项的输入栏中输入“-100000”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

F, 187, FY, -100000

### 5) 求解

依次单击: Main Menu→Solution→Solve→Current LS, 弹出“Solve Current Load Step”对话框, 单击“OK”按钮, ANSYS 开始求解计算, 求解完成后, ANSYS 图形窗口出现“Note”

对话框，单击“Close”按钮关闭该对话框。

对应命令流：

```
SOLVE
FINISH
```

## 6. 读入结构单元总体积

### 1) 在单元列表中定义单元体积

依次单击：Main Menu→General Postproc→Element Table→Define Table，弹出“Element Table Data”拾取对话框，单击“Add”按钮，弹出“Define Additional Element Table Items”对话框，如图 8-2 所示。在“Lab User label for item”选项的输入栏中输入“VOLUME”，在“Item,Comp Results data item”选项的左下拉列表中选择“Geometry”，右下拉列表中选择“Elem vcolumn VOLU”，单击“OK”按钮关闭该对话框。单击“Close”按钮关闭“Element Table Data”拾取对话框。

对应命令流：

```
ETABLE, VOLUME, VOLU
```

### 2) 读出单元总体积

依次单击：Main Menu→General Postproc→Element Table→Sum of Each Item，弹出“Tabular Sum of Each Element Table Item”对话框，单击“OK”按钮，显示单元总体积为 480。

对应命令流：

```
SSUM
```

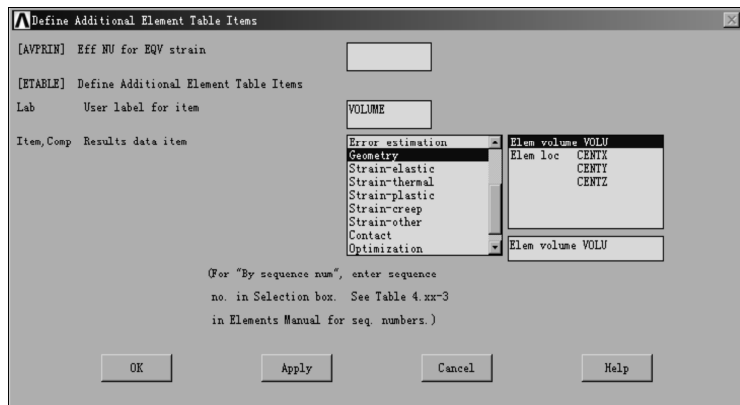


图 8-2 “Define Additiond Element Table Items”对话框

### 3) 提取单元总体积

依次单击：Utility Menu→Parameters→Get Scalar Data，弹出“Get Scalar Data”对话框，在“Type of Data to be Retrieved”选项的左列表框中选择“Results Data”，右列表框中选择“Elem Table Sums”。单击“OK”按钮，弹出“Get Element Table Sum Results”对话框，在“Name of Parameter to be Defined”选项的输入栏中输入“TVOLUME”，单击“OK”按钮关

闭该对话框。

对应命令流:

```
*GET, TVOLUME, SSUM, ,ITEM, VOLUME
```

#### 4) 参看总体积数值

依次单击: Utility Menu→Parameters→Scalar Parameters, 弹出“Scalar Parameters”对话框, 将会发现 TVOLUME=1.8 出现在窗口中。单击“OK”按钮关闭该对话框。

### 7. 读取应力大小

#### 1) 在单元列表中定义单元应力

依次单击: Main Menu→General Postproc→Element Table→Define Table, 弹出“Element Table Data”拾取对话框, 单击“Add”按钮, 弹出“Define Additional Element Table Items”对话框, 在“User label for item”选项的输入栏中输入“STRESS”, 在“Item,Comp Results Data Item”选项的左列表框中选择“Stress”, 右列表框中选择“von Mises SEQV”。单击“OK”按钮关闭该对话框。单击“Close”按钮关闭“Element Table Data”拾取对话框。

对应命令流:

```
ETABLE, STRESS, S, EQV
```

#### 2) 对单元应力大小进行排序

依次单击: Main Menu→General Postproc→List Results→Sorted Listing→Sort Element, 弹出“Sort Elements”对话框, 在“ORDER Order in which to sort”选项的下拉列表中选择“Descending order”, 在“Item,Comp Sort elems based on-”选项的下拉列表中选择“STRESS”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
ESORT, ETAB, STRESS
```

#### 3) 提取单元最大、最小应力

依次单击: Utility Menu→Parameters→Get Scalar Data, 弹出“Get Scalar Data”对话框, 在“Type of Data to be Retrieved”选项的左列表框中选择“Results Data”, 右列表框中选择“Global measures”。单击“OK”按钮, 出现“Get Global Measures from Selected Node Set”拾取对话框, 在“Glb measure to retrieve”选项的左列表框中选择“Stress”, 右列表框中选择“von Mises SEQV”。在“Name of parameter to be defined”选项的输入栏中输入“smin”, 在“Retrieve max or min value”选项的下拉列表中选择“Minimum value”。单击“Apply”按钮。在“Name of parameter to be defined”选项的输入栏中输入“smax”, 在“Retrieve max or min value”选项的下拉列表中选择“Maximum value”。单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
*GET, SMAX, SORT, , MAX
```

```
*GET, SMIN, SORT, , MIN
```



## 8. 生成优化分析文件

依次单击: Utility Menu→File→Write DB Log File, 弹出“Write Database Log”对话框。在“Write Database Log to”选项的输入栏中输入“Beam.lgw”。单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
LGWRITE, 'BEAM', 'lgw'
```

## 9. 进入优化处理器并指定分析文件

依次单击: Main Menu→Design Opt→Analysis File→Assign, 弹出“Assign Analysis File”拾取对话框, 在其输入栏中选取上一步生成的“Beam.lgw”文件, 单击“OK”按钮关闭该拾取对话框。

对应命令流:

```
OPANL, 'BEAM', 'lgw'
```

## 10. 定义优化设计变量

依次单击: Main Menu→Design Opt→Design Variables, 弹出“Design Variables”对话框, 单击“Add”按钮, 弹出“Define a Design Variable”对话框, 在“Parameter name”选项的下拉列表中选择“H1”, 在“Minimun value”选项的输入栏中输入“0.2”, 在“Maximun value”选项的输入栏中输入“0.8”, 在“Convergence tolerance”选项的输入栏中输入“0.01”, 单击“Apply”按钮。采取同样的方式, 在“Parameter name”选项的下拉列表中选择“H2”, 在“Minimun value”选项的输入栏中输入“0.2”, 在“Maximun value”选项的输入栏中输入“0.8”, 在“Convergence tolerance”选项的输入栏中输入“0.01”, 单击“Apply”按钮。再次采取同样的方式, 在“Parameter name”选项的下拉列表中选择“H3”, 在“Minimun value”选项的输入栏中输入“0.2”, 在“Maximun value”选项的输入栏中输入“0.8”, 在“Convergence tolerance”选项的输入栏中输入“0.01”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。单击“Close”按钮关闭“Design Variables”拾取对话框。

对应命令流:

```
OPVAR, H1, DV, 0.2, 0.8, 0.01
```

```
OPVAR, H2, DV, 0.2, 0.8, 0.01
```

```
OPVAR, H3, DV, 0.2, 0.8, 0.01
```

## 11. 定义优化状态变量

依次单击: Main Menu→Design Opt→State Variables, 弹出“State Variables”拾取对话框, 单击“Add”按钮, 弹出“Define a State Variable”对话框, 在“Parameter name”选项的下拉列表中选择“SMAX”, 在“Minimun value”选项的输入栏中输入“-50e6”, 在“Maximun value”选项的输入栏中输入“50e6”, 在“Convergence tolerance”选项的输入栏中输入“0.01”, 单击“Apply”按钮。采取同样的方式, 在“Parameter name”选项的下拉列表中选择“SMIN”, 在“Minimun value”选项的输入栏中输入“-50e6”, 在“Maximun value”选项的输入栏中

输入“50e6”，在“Convergence tolerance”选项的输入栏中输入“0.01”，单击“OK”按钮关闭该对话框。单击“Close”按钮关闭“State Variables”拾取对话框。

对应命令流：

```
OPVAR, SMAX, SV, -50e6, 50e6, 0.01
OPVAR, SMIN, SV, -50e6, 50e6, 0.01
```

## 12. 存储优化数据库

依次单击：Main Menu→Design Opt→Opt Database→Save，弹出“Save Optimization Data”拾取对话框，在其输入栏中输入“BEAM.opt”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流：

```
OPSAVE, 'BEAM', 'opt', ''
```

## 13. 设置体积为目标函数

依次单击：Main Menu→Design Opt→Objective，弹出“Define Objective Function”对话框，在“Parameter Name”选项的下拉列表中选择“TVOLUME”，在“TOLER”选项的输入栏中输入“0.001”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流：

```
OPVAR, TVOLUME, OBJ, , , 0.001
```

## 14. 保留最优方案

在 GUI 命令输入栏中输入“OPKEEP, ON”，单击“Enter”键确定。

对应命令流：

```
OPKEEP, ON
```

**注意：**优化的迭代过程中，目前的迭代结果永远被储存在 Jobname.DB（模型数据）及 Jobname.RST（results）中。如果事先使用命令“OPKEEP, ON”，则 ANSYS 保留另外一个模型数据（Jobname.BDB），以及一个结果文件（Jobname.BRST）来存储至目前为止最好的设计组（best design set）。

## 15. 指定一阶优化方法

依次单击：Main Menu→Design Opt→Method/Tool，弹出“Specify Optimization Method”对话框，在“Select Method/Tool”选项的下拉列表中选择“Sub-Problem”，单击“OK”按钮，弹出“Controls for Sub-Problem Optimizaiton”对话框，在“Maximum iterations”选项的输入栏中输入“30”，在“Max infeasible sets”选项的输入栏中输入“7”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流：

```
OPTYPE, SUBP
OPSUBP, 30, 7
```

OPEQN, 0, 0, 0, 0, 0,

16. 运行优化

依次单击：Main Menu→Design Opt→Run，弹出“Begin Execution of Run”对话框。单击“OK”按钮开始优化运算。

对应命令流：

OPEXE

17. 列表显示优化结果

依次单击：Main Menu→Design Opt→Design Sets→List，弹出“List Design Sets”对话框，选择“ALL Sets”选项，单击“OK”按钮关闭该对话框。将列表显示该优化计算迭代了 17 步，最优解为第 10 步，此时 SMAX=0.23412e8，SMIN=0.37903e-5，H1=0.40566，H2=0.20122，H3=0.20569，TVOLUME=0.88458。

对应命令流：

OPLIST,ALL, ,0

**注意：**在工程应用中，通常将结果进行圆整，如在本例中，将变量最终优化结果取为 H1=0.41，H2=0.21，H3=0.21。

18. 图像显示目标函数优化迭代过程

依次单击：Main Menu→Design Opt→Design Sets→Graphs/Tables，弹出“Graph/List Tables of Design Set Parameters”对话框，在“X-variable parameter”选项的下拉列表中选择“Set number”，在“Y-variable parameter”选项的下拉列表中选择“TVOLUME”。单击“OK”按钮，将显示 TVOLUME 迭代曲线，如图 8-3 所示。

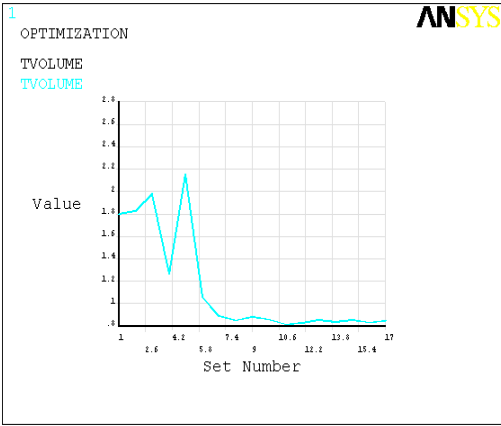


图 8-3 图形显示目标函数 TVOLUME 的迭代曲线

对应命令流：

XVAROPT, ''

## PLVAROPT,TVOLUME

## 19. 图像显示设计变量优化迭代过程

依次单击: Main Menu→Design Opt→Design Sets→Graphs/Tables, 弹出“Graph/List Tables of Design Set Parameters”对话框, 在“X-variable parameter”选项的下拉列表中选择“Set number”, 在“Y-variable parameter”选项的下拉列表中选择“H1,H2,H3”。单击“OK”按钮, 将显示各设计变量的迭代曲线, 如图 8-4 所示。

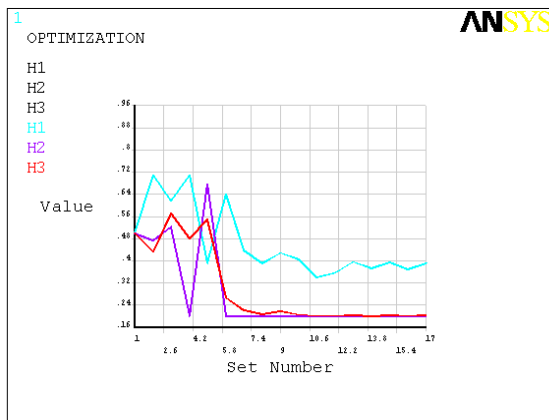


图 8-4 图形显示各设计变量的迭代曲线

对应命令流:

```
XVAROPT,'  
PLVAROPT, H1, H2, H3
```

优化前的矩形截面梁有限元模型如图 8-5 所示, 应力分布云图如图 8-6 所示, 打开 EX8-1.bdb 文件, 则可查看优化后的矩形截面梁最优解的有限元模型, 如图 8-7 所示, 应力分布云图如图 8-8 所示。

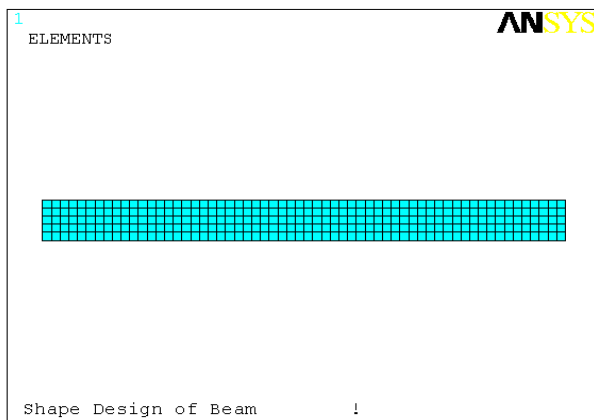


图 8-5 图形显示优化前的矩形截面梁有限元模型

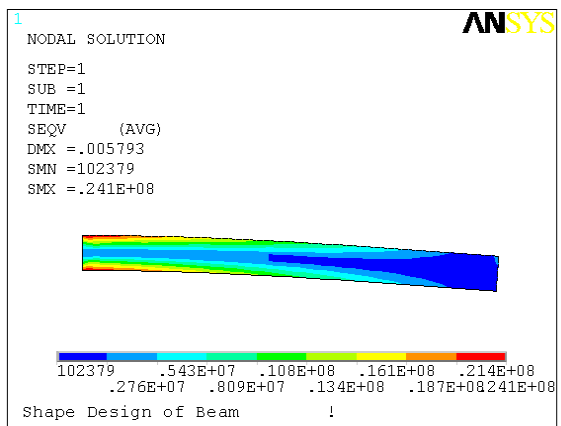


图 8-6 图形显示优化前的矩形截面梁应力分布云图

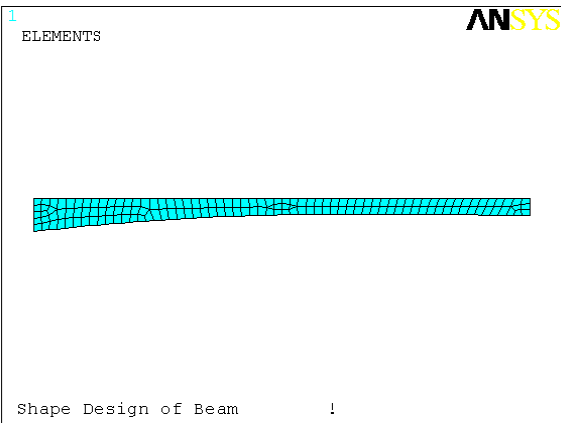


图 8-7 图形显示优化后的矩形截面梁有限元模型

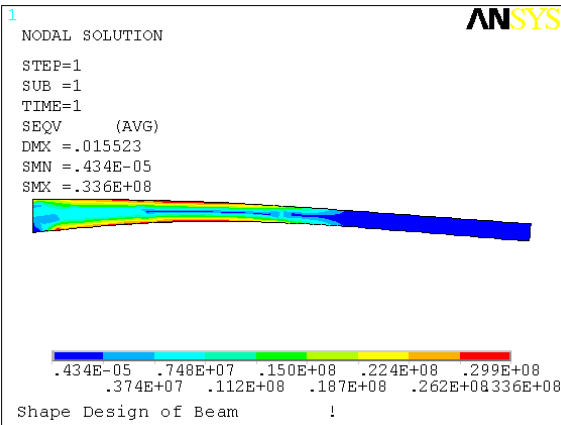


图 8-8 图形显示优化后的矩形截面梁应力分布云图

### 8.3.4 矩形截面梁结构优化完整命令流

```

FINISH                                !退出以前模块
/CLEAR, START                         !清除系统中所有数据，读取启动文件设置
! (1) 建立工作文件名和工作标题
/FILNAME, EX8-1                      !指定当前工作的文件名
/TITLE, Shape Design of Beam         !定义标题
! (2) 定义单元类型及实常数
/PREP7                               !进入前处理模块
ET, 1, PLANE42, , , 3               !定义单元类型
R, 1, 0.6                            !定义实常数
! (3) 定义材料性能参数
MP, EX, 1, 200e9                    !定义材料弹性模量
MP, NUXY, 1, 0.3                    !定义材料泊松比
! (4) 建立几何模型、划分网格
H1=0.5                               !参数化定义变量
H2=0.5
H3=0.5
K, 1, 0, 0                          !定义关键点位置
K, 2, 3, 0
K, 3, 6, 0
K, 4, 0, -H1
K, 5, 3, -H2
K, 6, 6, -H3
L, 1, 2                              !通过关键点生成线段
L, 2, 3
L, 1, 4
L, 3, 6
SPLINE, 4, 5, 6, , , , , 1, 0, 0    !通过关键点生成样条曲线
A, 1, 2, 5, 4                        !通过关键点生成面
A, 2, 3, 6, 5
ESIZE, 0.1                          !定义单元划分尺寸
AMESH, ALL                          !划分所有面的网格
FINISH                               !退出前处理模块
! (5) 加载求解
/SOLU                                !进入前处理模块
ANTYPE, STATIC                      !定义结构分析类型为静力分析
OUTPR, BASIC, ALL                   !在输出结果中，列出所有载荷步计算结果
D, 1, ALL                           !对节点 1 施加固定约束
D, 70, ALL                          !对节点 70 施加固定约束
D, 69, ALL                          !对节点 69 施加固定约束
D, 68, ALL                          !对节点 68 施加固定约束
D, 67, ALL                          !对节点 67 施加固定约束

```

D, 37, ALL	!对节点 37 施加固定约束
F, 187, FY, -100000	!在节点 187 上施加-Y 方向大小为 100kN 的力
SOLVE	!发出求解命令
FINISH	!退出求解模块
! (6) 进入一般后处理模块	
/POST1	!进入一般后处理模块
ETABLE, VOLUME, VOLU	!在单元列表中定义单元体积
SSUM	!读出单元总体积
*GET, TVOLUME, SSUM, , ITEM, VOLUME	!提取单元总体积
ETABLE, STRESS, S, EQV	!在单元列表中定义单元应力
ESORT, ETAB, STRESS	!对单元应力大小进行排序
*GET, SMAX, SORT, , MAX	!提取单元最大应力
*GET, SMIN, SORT, , MIN	!提取单元最小应力
LGWRITE, 'BEAM', 'lgw'	!生成优化分析文件
FINISH	!退出一般后处理模块
! (7) 进入优化设计模块	
/OPT	!进入优化模块
OPANL, 'BEAM', 'lgw'	!指定优化文件
OPVAR, H1, DV, 0.2, 0.8, 0.01	!定义设计变量 H1
OPVAR, H2, DV, 0.2, 0.8, 0.01	!定义设计变量 H2
OPVAR, H3, DV, 0.2, 0.8, 0.01	!定义设计变量 H3
OPVAR, SMAX, SV, -50e6, 50e6, 0.01	!定义状态变量 SMAX (应力)
OPVAR, SMIN, SV, -50e6, 50e6, 0.01	!定义状态变量 SMIN (应力)
OPSAVE, 'BEAM', 'OPT', ''	!存储优化数据
OPVAR, TVOLUME, OBJ, , , 0.001	!定义目标函数 TVOLUME (体积)
OPKEEP, ON	!保留最好的优化方案
OPTYPE, SUBP	!指定优化方法: 子问题近似法
OPSUBP, 30, 7	
OPEQN, 0, 0, 0, 0, 0	!规定最多优化迭代 30 次
OPEXE	!执行优化计算
OPLIST, ALL, , 0	!列表显示所有参数迭代过程
XVAROPT, ''	!定义 x 轴参量
PLVAROPT, TVOLUME	!图像显示目标函数迭代曲线
PLVAROPT, H1, H2, H3	!图像显示设计变量迭代曲线

## 8.4 工程实例：汽车起重机吊臂结构优化

吊臂是汽车起重机最重要的金属结构之一，它的性能对起重机工作性能具有极其重要的影响。合理地设计出具有足够刚、强度和稳定性，而且自重又轻的吊臂有着非常重要的工程意义。

## 8.4.1 问题描述

吊臂结构较为复杂，这里对某 8t 汽车起重机二节臂结构进行简化作为分析对象。

实际使用中，吊臂具有多种工况。这里选择全臂长工况：载荷选取最大起质量为 3.2T。起升载荷动载系数为 1.15。材料为 16Mn 钢，弹性模量为  $2.1 \times 10^{11} \text{Pa}$ ，泊松比为 0.3，屈服极限为 360MPa。安全系数为 1.5，则材料许用应力为 240MPa。二节臂结构平面简化图如图 8-9 所示。上盖板初始设计厚度为 0.015m，下盖板初始厚度为 0.015m，腹板初始厚度为 0.01m。吊臂宽为 0.31m。需要在材料允许应力范围内对各板厚进行优化设计，使吊臂质量达到最轻。

为简化实例，这里仅仅考虑强度因素。载荷简化为在吊臂前端竖直方向下的集中力作用。采用在节点位置处施加法向位移约束来近似模拟实际工程中的滑块作用。

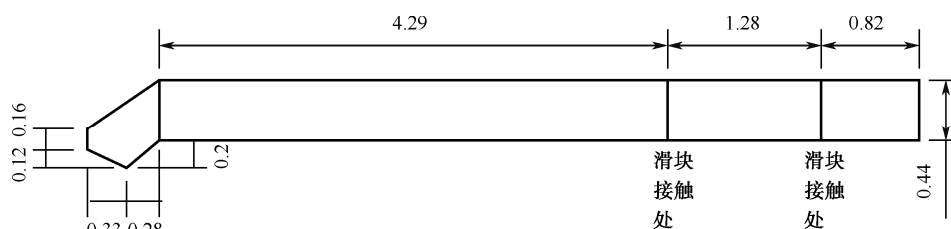


图 8-9 二节臂结构简化图

## 8.4.2 问题分析

该问题属于结构静力分析问题。设置设计变量： $H_1=0.015\text{m}$ ， $H_2=0.015\text{m}$ ， $H_3=0.01\text{m}$ 。上、下限均为 0.005m 和 0.02m。状态变量为结构最大应力 SMAX，最小应力 SMIN，上、下限均为 -240e6Pa 和 240e6Pa。目标函数为吊臂体积，优化目的是使吊臂体积最小。

## 8.4.3 求解步骤

### 1. 建立工作文件名和工作标题

#### 1) 定义工作文件名

依次单击：Utility Menu→File→Change Jobname，弹出“Change Jobname”对话框。在“[/FILNAM] Enter new jobname”选项的输入栏中输入工作文件名“EX8-2”，勾选“New log and error files”选项的复选框，设置为“Yes”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流：

```
/FILNAME, EX8-2
```

#### 2) 定义工作标题

依次单击：Utility Menu→File→Change Title，弹出“Change Title”拾取对话框，在其输



入栏中输入“Shape Design of Crane”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流：

```
/TITLE, Shape Design of Crane
```

## 2. 定义单元类型及实常数

### 1) 定义单元类型

依次单击：Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete，弹出“Element Types”拾取对话框。单击“Add”按钮，弹出“Library of Element Types”对话框，在“Library of Element Types”选项的左列表框中选择“Structural Shell”，右列表框中选择“Elastic 4node 63”，在“Element Type reference number”选项的输入栏中输入“1”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

### 2) 退出单元定义

单击“Element Types”拾取对话框上的“Close”按钮关闭该拾取对话框。

对应命令流：

```
ET, 1, SHELL63
```

### 3) 参数化定义变量

依次单击：Utility Menu→Parameters→Scalar Parameters，弹出“Scalar Parameters”对话框，在“Selection”选项的输入栏中输入“H1=0.015”，单击“Accept”按钮。采取同样的方式，在“Selection”选项的输入栏中输入“H2=0.015”，单击“Accept”按钮。再次采取同样的方式，在“Selection”选项的输入栏中输入“H3=0.01”，单击“Accept”按钮。再单击“Close”按钮关闭该对话框。

对应命令流：

```
H1=0.015  
H2=0.015  
H3=0.01
```

### 4) 定义单元实常数

依次单击：Main Menu→Preprocessor→Real Constants→Add/Edit/Delete，弹出“Real Constants”拾取对话框，单击“Add...”按钮，弹出“Element Type for Real Constants”对话框，单击“OK”按钮，弹出“Real Constant Set Number 1, for SHELL63”对话框，在“Real Constant Set No.”选项的输入栏中输入“1”，在“Shell thickness at node I TK(I)”选项的输入栏中输入“H1”，单击“Apply”按钮。采取同样的方式，在“Real Constant Set No.”选项的输入栏中输入“2”，在“Shell thickness at node I TK(I)”选项的输入栏中输入“H2”，单击“Apply”按钮。再次采取同样的方式，在“Real Constant Set No.”选项的输入栏中输入“3”，在“Shell thickness at node I TK(I)”选项的输入栏中输入“H3”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流：

```
R, 1, H1  
R, 2, H2  
R, 3, H3
```

### 3. 定义材料性能参数

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Material Models, 弹出“Define Material Model Behavior”对话框。在“Material Models Available”选项中依次单击: Structural→Linear→Elastic→Isotropic, 弹出“Linear Isotropic Properties for Material Number 1”对话框, 在“EX”选项的输入栏中输入“2.1e11”, 在“PRXY”选项的输入栏中输入“0.3”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。在“Define Material Model Behavior”对话框中依次单击: Material→Exit 关闭该对话框。

对应命令流:

```
MP, EX, 1, 2.1e11
MP, NUXY, 1, 0.3
```

### 4. 建立几何模型

#### 1) 生成节点

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→In Active CS, 弹出“Create Keypoints in Active Coordinate System”对话框, 参见表 8-2 所示完成关键点位置参数设置。

表 8-2 关键点位置参数设置一览表

关键点号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
X 坐标	0	0.82	2.1	6.39	6.67	7	7	6.39	2.1	0.82	0
Y 坐标	0	0	0	0	-0.2	-0.08	0.08	0.435	0.435	0.435	0.435

对应命令流:

```
K, 1, 0, 0
K, 2, 0.82, 0
K, 3, 2.1, 0
K, 4, 6.39, 0
K, 5, 6.67, -0.2
K, 6, 7, -0.08
K, 7, 7, 0.08
K, 8, 6.39, 0.435
K, 9, 2.1, 0.435
K, 10, 0.82, 0.435
K, 11, 0, 0.435
```

#### 2) 由节点生成面

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Arbitrary→Through KPs, 弹出“Create Area thru KPs”拾取对话框, 在其输入栏中输入“1,11,10,2”, 单击“Apply”按钮。采取同样的方式, 在输入栏中输入“2,10,9,3”, 单击“Apply”按钮。再次采取同样的方式, 在输入栏中输入“3,9,8,4”, 单击“Apply”按钮。再次采取同样的方式, 在输入栏

中输入“4,5,6,7,8”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流：

```
A, 1, 11, 10, 2
A, 2, 10, 9, 3
A, 3, 9, 8, 4
A, 4, 5, 6, 7, 8
```

### 3) 复制面

依次单击：Main Menu→Preprocessor→Copy→Areas，弹出“Copy Areas”拾取对话框，在其输入栏中输入“ALL”，单击“OK”按钮，弹出“Copy Areas”对话框，在“Number of copies”选项的输入栏中输入“2”，在“Z-offset in active CS”选项的输入栏中输入“-0.31”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流：

```
AGEN, 2, ALL, , , , -0.31 , , 0
```

### 4) 由节点生成面

依次单击：Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas →Arbitrary→Through KPs，弹出“Create Area thru KPs”拾取对话框，在其输入栏中输入“11,10,14,15”，单击“Apply”按钮。采取同样的方式，在输入栏中输入“10,14,17,9”，单击“Apply”按钮。再次采取同样的方式，在输入栏中输入“9,17,19,8”，单击“Apply”按钮。再次采取同样的方式，在输入栏中输入“1,2,13,12”，单击“Apply”按钮。再次采取同样的方式，在输入栏中输入“2,13,16,3”，单击“Apply”按钮。再次采取同样的方式，在输入栏中输入“3,16,18,4”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流：

```
A, 11, 10, 14, 13
A, 10, 14, 16, 9
A, 9, 16, 18, 8
A, 1, 2, 15, 12
A, 2, 3, 17, 15
A, 3, 17, 19, 4
```

## 5. 网格划分

### 1) 定义单元划分尺寸

依次单击：Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Global→Size，弹出“Global Element Sizes”对话框，在“SIZE Element edge length”选项的输入栏中输入“0.1”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流：

```
ESIZE, 0.1
```

## 2) 定义单元属性

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→Default Attribs, 弹出“Meshing Attributes”对话框, 在“Real constant set number”选项的下拉列表中选择“1”, 其余保持默认设置, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
TYPE, 1  
MAT, 1  
REAL, 1
```

## 3) 对面进行网格划分

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Areas→Mapped→3 or 4 sided, 弹出“Mesh Areas”对话框, 在其输入栏中输入“9,10,11”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
AMESH, 9  
AMESH, 10  
AMESH, 11
```

## 4) 定义单元属性

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→Default Attribs, 弹出“Meshing Attributes”对话框, 在“Real constant set number”选项的下拉列表中选择“2”, 其余保持默认设置, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
TYPE, 1  
MAT, 1  
REAL, 2
```

## 5) 对面进行网格划分

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Areas→Mapped→3 or 4 sided, 弹出“Mesh Areas”拾取对话框, 在其输入栏中输入“12,13,14”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
AMESH, 12  
AMESH, 13  
AMESH, 14
```

## 6) 定义单元属性

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→Default Attribs, 弹出“Meshing Attributes”对话框, 在“Real constant set number”选项的下拉列表中选择“3”, 其余保持默认设置, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
TYPE, 1
```

MAT, 1  
REAL, 3

#### 7) 对面进行网格划分

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Areas →Mapped→3 or 4 sided, 弹出“Mesh Areas”拾取对话框, 在其输入栏中输入“1,2,3,5,6,7”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

AMESH, 1  
AMESH, 2  
AMESH, 3  
AMESH, 5  
AMESH, 6  
AMESH, 7

#### 8) 其他面进行网格划分

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Areas →Free, 弹出“Mesh Areas”拾取对话框, 在其输入栏中输入“4,8”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

AMESH, 4  
AMESH, 8

#### 9) 反转面的法线

依次单击: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Move/Modify→Reverse Normals→of Areas, 弹出“Reverse Area Normals”拾取对话框, 在其输入栏中输入“1,2,3,8,10,11,12,13”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

AREVERSE,1  
AREVERSE,2  
AREVERSE,3  
AREVERSE,8  
AREVERSE,10  
AREVERSE,11  
AREVERSE,12  
AREVERSE,13

吊臂有限元模型如图 8-10 所示。

### 6. 加载求解

#### 1) 定义求解类型

依次单击: Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis, 弹出“New Analysis”对话框, 选择分析类型为“Static”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

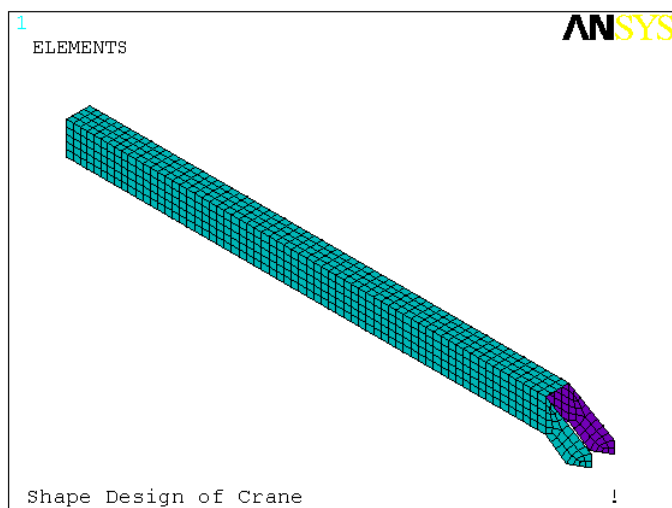


图 8-10 图形显示吊臂有限元模型

对应命令流:

```
ANTYPE, STATIC
```

## 2) 选择输出结果

依次单击: Main Menu→Solution→Analysis Type→Sol'n Controls, 弹出“Solution Controls”对话框, 在“Write Items to Results File”选项的下拉列表中选择“All solution items”。

对应命令流:

```
OUTPR, BASIC, ALL
```

## 3) 定义节点位移约束

依次单击: Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural →Displacement→On Nodes, 弹出“Apply U,ROT on Nodes”拾取对话框, 在其输入栏中输入“665,668,701,704,929,932,965,968”, 单击“OK”按钮关闭该拾取对话框。弹出“Apply U,ROT on Nodes”对话框, 在“Lab 2 DOFs to be constrained”选项的下拉列表中选择“UX”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

依次单击: Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes, 弹出“Apply U,ROT on Nodes”拾取对话框, 在其输入栏中输入“12,14,65,67,342,344,395,397”, 单击“OK”按钮关闭该拾取对话框。弹出“Apply U,ROT on Nodes”对话框, 在“Lab 2 DOFS to be constrained”选项的下拉列表中选择“UY”选项, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
D, 665, UX
D, 668, UX
D, 701, UX
D, 704, UX
```

D, 929, UX  
D, 932, UX  
D, 965, UX  
D, 968, UX  
D, 12, UY  
D, 14, UY  
D, 65, UY  
D, 67, UY  
D, 342, UY  
D, 344, UY  
D, 395, UY  
D, 397, UY

#### 4) 定义载荷

依次单击: Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Force/Moment→On Nodes, 弹出“Apply F/M on Nodes”拾取对话框, 在其输入栏中输入“1189,1225”, 单击“OK”按钮, 在“Lab Direction of force/mom”选项的下拉列表中选择“FY”, 在“VALUE Force/moment value”选项的输入栏中输入“-18400”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

F, 1189, FY, -18400  
F, 1225, FY, -18400

#### 5) 求解

依次单击: Main Menu→Solution→Solve→Current LS, 弹出“Solve Current Load Step”对话框, 单击“OK”按钮, ANSYS 开始求解计算, 求解完成后, ANSYS 图形显示窗口出现“Note”对话框, 单击“Close”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

SOLVE  
FINISH

### 7. 读入结构单元总体积

#### 1) 在单元列表中定义单元体积

依次单击: Main Menu→General Postproc→Element Table →Define Table, 弹出“Element Table Data”拾取对话框, 单击“Add”按钮, 弹出“Define Additional Element Table Items”对话框, 在“User label for item”选项的输入栏中输入“VOLUME”, 在“Item,Comp Results Data Item”选项的左列表框中选择“Geometry”, 右列表框中选择“ElemVolume VOLU”。单击“OK”按钮关闭该对话框。在“Element Table Data”拾取对话框中单击“Close”按钮关闭该拾取对话框。

对应命令流:

ETABLE, VOLUME, VOLU

## 2) 读出单元总体积

依次单击: Main Menu→General Postproc→Element Table→Sum of Each Item, 弹出“Tabular Sum of Each Element Table Item”对话框, 单击“OK”按钮, 显示单元总体积为 480。

对应命令流:

```
SSUM
```

## 3) 提取单元总体积

依次单击: Utility Menu→Parameters→Get Scalar Data, 弹出“Get Scalar Data”对话框, 在“Type of Data to be Retrieved”选项的左列表框中选择“Results Data”, 右列表框中选择“Elem Table Sums”。单击“OK”按钮, 弹出“Get Element Table Sum Results”对话框, 在“Name of Parameter to be Defined”选项的输入栏中输入“TVOLUME”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
*GET, TVOLUME, SSUM, , ITEM, VOLUME
```

# 8. 读取应力大小

## 1) 在单元列表中定义单元应力

依次单击: Main Menu→General Postproc→Element Table →Define Table, 弹出“Element Table Data”拾取对话框, 单击“Add”按钮, 弹出“Define Additional Element Table Items”对话框, 在“User label for item”选项的输入栏中输入“STRESS”, 在“Item,Comp Results Data Item”选项的左列表框中选择“Stress”, 右列表框中选择“von Mises SEQV”。单击“OK”按钮关闭该对话框。在“Element Table Data”拾取对话框中单击“Close”按钮关闭该拾取对话框。

对应命令流:

```
ETABLE, STRESS, S, EQV
```

## 2) 对单元应力大小进行排序

依次单击: Main Menu→General Postproc→List Results→Sorted Listing→Sort Element, 弹出“Sort Elements”对话框, 在“ORDER Order in which to sort”选项的下拉列表中选择“Descending order”, 在“Item, Comp Sort elems based on-”选项的下拉列表中选择“STRESS”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
ESORT, ETAB, STRESS
```

## 3) 提取单元最大、最小应力

依次单击: Utility Menu→Parameters→Get Scalar Data, 弹出“Get Scalar Data”对话框, 在“Type of Data to be Retrieved”选项的左列表框中选择“Results Data”, 右列表框中选择“Global measures”, 单击“OK”按钮, 弹出“Get Global Measures from Selected Node Set”拾取对话框, 在“Glb measure to retrieve”选项的左列表框中选择“Stress”, 右列表框中选



择“von Mises SEQV”。在“Name of parameter to be defined”选项的输入栏中输入“smin”，在“Retrieve max or min value”对话框中选择“Minimum value”选项，单击“Apply”按钮。在“Name of parameter to be defined”选项的输入栏中输入“smax”，在“Retrieve max or min value”对话框中选择“Maximum value”选项，单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流：

```
*GET, SMAX, SORT, , MAX
*GET, SMIN, SORT, , MIN
```

## 9. 生成优化分析文件

依次单击：Utility Menu→File→Write DB Log File，弹出“Write Database Log”对话框。在“Write Database Log to”选项的输入栏中输入“Crane.lgw”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流：

```
LGWRITE, 'Crane', 'lgw'
```

## 10. 进入优化处理器并指定分析文件

依次单击：Main Menu→Design Opt→Analysis File→Assign，弹出“Assign Analysis File”对话框，单击“Browes...”按钮，选取上一步生成的“Crane.lgw”文件。单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流：

```
OPANL, 'Crane', 'LGW'
```

## 11. 定义优化设计变量

依次单击：Main Menu→Design Opt→Design Variables，弹出“Design Variables”拾取对话框，单击“Add”按钮，弹出“Define a Design Variable”对话框，在“Parameter name”选项的下拉列表中选择“H1”，在“Minimum value”选项的输入栏中输入“0.005”，在“Maximum value”选项的输入栏中输入“0.02”，在“Convergence tolerance”选项的输入栏中输入“0.001”，单击“Apply”按钮。采取同样的方式，在“Parameter name”选项的下拉列表中选择“H2”，在“Minimum value”选项的输入栏中输入“0.005”，在“Maximum value”选项的输入栏中输入“0.02”，在“Convergence tolerance”选项的输入栏中输入“0.001”，单击“Apply”按钮。再次采取同样的方式，在“Parameter name”选项的下拉列表中选择“H3”，在“Minimum value”选项的输入栏中输入“0.005”，在“Maximum value”选项的输入栏中输入“0.02”，在“Convergence tolerance”选项的输入栏中输入“0.001”，单击“OK”按钮关闭该对话框。单击“Close”按钮关闭该对话框。

对应命令流：

```
OPVAR, H1, DV, 0.005, 0.02, 0.001
OPVAR, H2, DV, 0.005, 0.02, 0.001
OPVAR, H3, DV, 0.005, 0.02, 0.001
```

## 12. 定义优化状态变量

依次单击: Main Menu→Design Opt→State Variables, 弹出“State Variables”拾取对话框, 单击“Add”按钮, 弹出“Define a State Variable”对话框, 在“Parameter name”选项的下拉列表中选择“SMAX”, 在“Minimun value”选项的输入栏中输入“-240e6”, 在“Maximun value”选项的输入栏中输入“240e6”, 在“Convergence tolerance”选项的输入栏中输入“0.01”, 单击“Apply”按钮。采取同样的方式, 在“Parameter name”选项的下拉列表中选择“SMIN”, 在“Minimun value”选项的输入栏中输入“-240e6”, 在“Maximun value”选项的输入栏中输入“240e6”, 在“Convergence tolerance”选项的输入栏中输入“0.01”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。单击“Close”按钮关闭“Design Variables”拾取对话框。

对应命令流:

```
OPVAR, SMAX, SV, -240e6, 240e6, 0.01
OPVAR, SMIN, SV, -240e6, 240e6, 0.01
```

## 13. 存储优化数据库

依次单击: Main Menu→Design Opt→Opt Database→Save, 弹出“Save Optimization Data”对话框, 单击“Browes...”按钮, 选取生成的“Crane.opt”文件, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
OPSAVE, 'Crane','opt',''
```

## 14. 设置体积为目标函数

依次单击: Main Menu→Design Opt→Objective, 弹出“Define Objective Function”对话框, 在“Parameter Name”选项的下拉列表中选择“TVOLUME”, 在“TOLER”选项的输入栏中输入“0.001”, 单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流:

```
OPVAR, TVOLUME, OBJ, , , 0.001
```

## 15. 保留最优方案

在 GUI 命令输入栏中输入“OPKEEP, ON”, 单击“Enter”键确定。

对应命令流:

```
OPKEEP, ON
```

## 16. 指定一阶优化方法

依次单击: Main Menu→Design Opt→Method/Tool, 弹出“Specify Optimization Method”对话框, 在“Select Method/Tool”选项的下拉列表中选择“Sub-Problem”, 再单击该对话框上“OK”按钮, 弹出“Controls for First-order Optimization”对话框, 在“Maximum iterations”

选项的输入栏中输入“30”，在“Max infeasible sets”选项的输入栏中输入“7”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

对应命令流：

```
OPTYPE, SUBP
OPSUBP, 30, 7
OPEQN, 0, 0, 0, 0, 0,
```

17. 运行优化

依次单击：Main Menu→Design Opt→Run，弹出“Begin Execution of Run”对话框。单击“OK”按钮开始优化运算。

对应命令流：

```
OPEXE
```

18. 列表显示优化结果

依次单击：Main Menu→Design Opt→Design Sets→List，弹出“List Design Sets”对话框，选择“ALL Sets”选项，单击“OK”按钮退出该对话框。

在列表显示该优化计算进行 8 次迭代过程，最优解为

```
SMAX=239.22MPa,
SMIN=44463Pa,
H1=0.59956e-2m,
H2=0.50304e-2m,
H3=0.66737e-2m,
TVOLUME=0.62029e-1m3
```

优化后的最大应力小于状态变量上限值为 240MPa，说明优化结果是有效的。  
在工程实际中，需要将设计变量进行圆整。于是取 H1=0.006m, H2=0.006m, H3=0.007m。  
对应命令流：

```
OPLIST, ALL, , 0
```

19. 图像显示目标函数优化迭代过程

依次单击：Main Menu→Design Opt→Design Sets→Graphs/Tables，弹出“Graph/List Tables of Design Set Parameters”对话框，在“X-variable parameter”选项的下拉列表中选择“Set number”，在“Y-variable parameter”选项的下拉列表中选择“TVOLUME”。单击“OK”按钮，将显示出目标函数 TVOLUME 的迭代曲线，如图 8-11 所示。

对应命令流：

```
XVAROPT, ''
PLVAROPT, TVOLUME
```

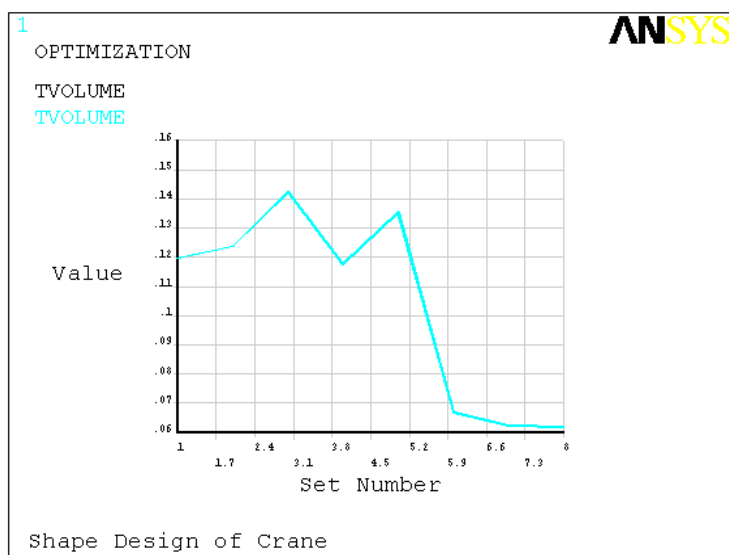


图 8-11 图形显示目标函数 TVOLUWE 的迭代曲线

## 20. 图像显示设计变量优化迭代过程

依次单击: Main Menu→Design Opt→Design Sets→Graphs/Tables, 弹出“Graph/List Tables of Design Set Parameters”对话框, 在“X-variable parameter”选项的下拉列表中选择“Set number”, 在“Y-variable parameter”选项的下拉列表中选择“H1,H2,H3”选项。单击“OK”按钮, 将显示各设计变量的迭代曲线, 如图 8-12 所示。

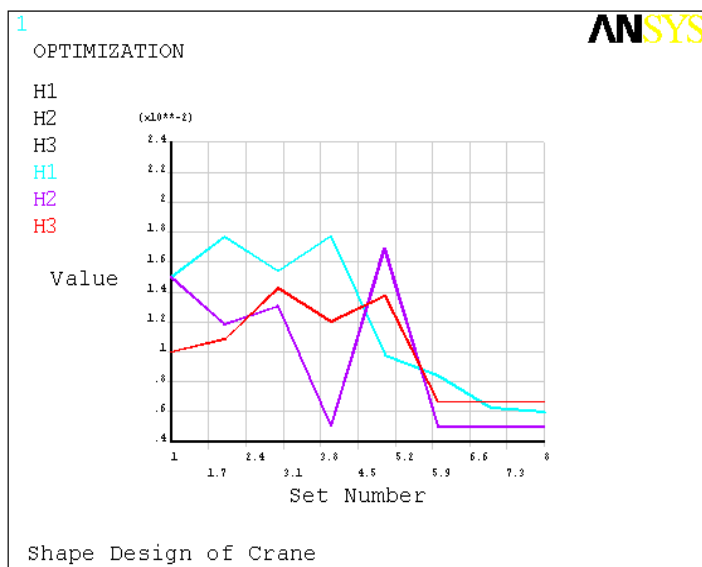


图 8-12 图形显示各设计变量的迭代曲线

对应命令流:

```
XVAROPT,''  
PLVAROPT,H1,H2,H3
```

在图形窗口中,可以查看到吊臂优化前、后应力分布云图分别如图 8-13 和图 8-14 所示。可见最大应力均出现在位移约束处,即滑块接触区域。这与工程实际状态一致,因为在滑块接触区域由于应力集中往往产生较大应力,导致吊臂发生局部变形。

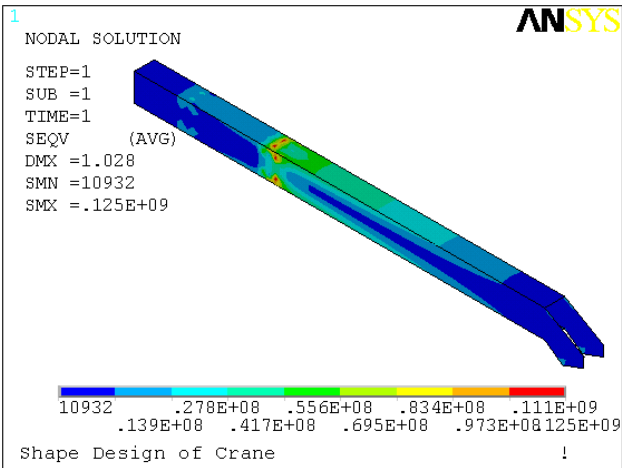


图 8-13 图形显示吊臂优化前应力分布云图

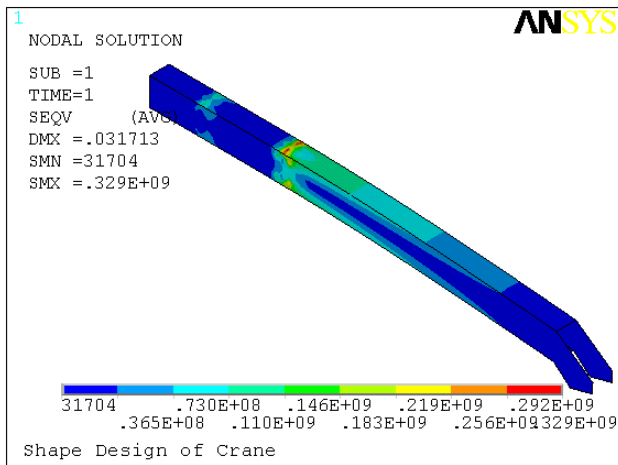


图 8-14 图形显示吊臂优化后应力分布云图

8.4.4 汽车起重机吊臂结构优化完整命令流

```
FINISH                                !退出以前模块  
/CLEAR,START                          !清除系统中所有数据,读取启动文件设置
```

! (1) 建立工作文件名和工作标题	
/FILENAME, EX8-2	!指定当前工作的文件名
/TITLE, Shape Design of Crane	!定义标题
! (2) 定义单元类型及实常数	
/PREP7	!进入前处理模块
ET,1,SHELL63	!定义单元类型
H1=0.015	!参数化定义变量
H2=0.015	
H3=0.01	
R,1,H1	!定义实常数
R,2,H2	
R,3,H3	
! (3) 定义材料性能参数	
MP,EX,1,2.1e11	!定义材料弹性模量
MP,NUXY,1,0.3	!定义材料泊松比
! (4) 建立几何模型、划分网格	
K,1,0,0	!定义关键点位置
K,2,0.82,0	
K,3,2.1,0	
K,4,6.39,0	
K,5,6.67,-0.2	
K,6,7,-0.08	
K,7,7,0.08	
K,8,6.39,0.435	
K,9,2.1,0.435	
K,10,0.82,0.435	
K,11,0,0.435	
A,1,11,10,2	!通过关键点生成面
A,2,10,9,3	
A,3,9,8,4	
A,4,5,6,7,8	
AGEN,2,ALL,,,-0.31,,0	!复制平移所有面
A,11,10,14,13	!通过关键点生成面
A,10,14,16,9	
A,9,16,18,8	
A,1,2,15,12	
A,2,3,17,15	
A,3,17,19,4	
ESIZE,0.1	!定义单元划分尺寸
TYPE, 1	!选择单元类型
MAT, 1	!选择单元材料属性
REAL, 1	!选择单元实常数
AMESH,9	!对面 9 进行网格划分
AMESH,10	!对面 10 进行网格划分
AMESH,11	!对面 11 进行网格划分

```
TYPE, 1
MAT, 1
REAL, 2
AMESH, 12
AMESH, 13
AMESH, 14
TYPE, 1
MAT, 1
REAL, 3
AMESH, 1
AMESH, 2
AMESH, 3
AMESH, 5
AMESH, 6
AMESH, 7
AMESH, 4
AMESH, 8
AREVERSE, 1
AREVERSE, 2
AREVERSE, 3
AREVERSE, 8
AREVERSE, 10
AREVERSE, 11
AREVERSE, 12
AREVERSE, 13
FINISH
! (5) 加载求解
/SOLU
ANTYPE, STATIC
OUTPR, BASIC, ALL
D, 665, UX
D, 668, UX
D, 701, UX
D, 704, UX
D, 929, UX
D, 932, UX
D, 965, UX
D, 968, UX
D, 12, UY
D, 14, UY
D, 65, UY
D, 67, UY
D, 342, UY
D, 344, UY
D, 395, UY
```

! 反转面的法线

! 退出前处理模块

! 进入前处理模块

! 定义结构分析类型为静力分析

! 在输出结果中，列出所有载荷步计算

! 对节点 665 施加  $X$  向位移约束

! 对节点 12 施加  $Y$  向位移约束

D,397,UY	
F,1189,FY,-18400	!在节点 1189 处施加-Y 方向的集中力
F,1225,FY,-18400	!在节点 1225 处施加-Y 方向的集中力
SOLVE	!发出求解命令
FINISH	!退出求解模块
! (6) 进入一般后处理模块	
/POST1	!进入一般后处理模块
ETABLE,VOLUME,VOLU	!在单元列表中定义单元体积读出单元总体积
SSUM	
*GET,TVOLUME,SSUM,,ITEM,VOLUME	!提取单元总体积
ETABLE,STRESS,S,EQV	!在单元列表中定义单元应力
ESORT,ETAB,STRESS	!对单元应力大小进行排序
*GET,SMAX,SORT,,MAX	!读出单元最大应力
*GET,SMIN,SORT,,MIN	!提取单元最小应力
LGWRITE,'Crane','lgw'	!生成优化分析文件
FINISH	!退出一般后处理模块
! (7) 进入优化设计模块	
/OPT	!进入优化模块
OPANL,'Crane','lgw'	!指定优化文件
OPVAR,H1,DV,0.005,0.02,0.001	!定义设计变量 H1
OPVAR,H2,DV,0.005,0.02,0.001	!定义设计变量 H2
OPVAR,H3,DV,0.005,0.02,0.001	!定义设计变量 H3
OPVAR,SMAX,SV,-240e6,240e6,0.01	!定义状态变量 SMAX (应力)
OPVAR,SMIN,SV,-240e6,240e6,0.01	!定义状态变量 SMIN (应力)
OPSAVE,'Crane','opt',''	!存储优化数据
OPVAR,TVOLUME,OBJ,,,0.001	!定义目标函数 TVOLUME (体积)
OPKEEP, ON	!保留最好的优化方案
OPTYPE,SUBP	!指定优化方法: 子问题近似法
OPSUBP,30,7	
OPEQN,0,0,0,0,0,	!规定最多优化迭代 30 次
OPEXE	!执行优化计算
OPLIST,ALL, ,0	!列表显示所有参数迭代过程
XVAROPT,''	!定义 X 轴参量
PLVAROPT,TVOLUME	!图像显示目标函数迭代曲线
XVAROPT,''	
PLVAROPT,H1,H2,H3	!图像显示设计变量迭代曲线

## 本章小结

本章主要介绍了优化设计的基本过程,包括优化设计概述,优化设计的基本步骤。在综合实例中,以矩形截面梁结构的优化为研究对象,详细介绍了在 ANSYS 中进行结构优化的具体步骤。在工程实例中,结合工程实际,在对汽车起重机吊臂基本臂结构进行合理简化的基础上进行了优化设计分析。



通过本章的学习,能帮助读者了解优化设计基本理论和一般步骤,并结合实例对优化过程有初步的认识和掌握。

## 思考题

- (1) 结构优化设计基本过程包括哪些步骤?
- (2) 在综合实例中采用 PLANE42 单元模拟梁结构。如果采用实体单元进行优化,则与平面单元有何不同?
- (3) 汽车起重机吊臂结构优化实例中,状态变量为刚度条件,又该如何设置?

## 常见疑难问题解析

在本章的实例操作过程中,或者在做其他 ANSYS 练习可能会遇到的一些问题,结合本章,汇总如下。

### (1) 如何选择设计变量?

设计变量往往是长度、厚度、直径或模型坐标等几何参数,其必须是正值。需要注意的是,要使用尽量少的设计变量,并给设计变量定义一个合理的范围(OPVAR 命令中的 MIN 和 MAX)。

### (2) 如何选择状态变量?

状态变量通常是控制设计的因变量数值,如应力、温度、热流率、频率、变形、吸收能、消耗时间等。需要注意的是,在零阶方法中,如果可能的话,选择与设计变量为线性或平方关系的参数为状态变量。

### (3) 如何选择目标函数?

目标函数是设计最小化或最大化的数值。目标函数值在优化过程中应为正值。同时,ANSYS 程序总是最小化目标函数。如果要最大化数值  $x$ ,就将问题转化为求数值  $X_1=C-x$  或  $X_1=1/x$  的最小值,其中  $C$  是远大于  $x$  的数值。定义  $C-x$  的方法比用  $1/x$  的方法要好,因为后者是反比关系,在零阶方法中不能得到准确的逼近。

### (4) 如何重新开始执行优化分析

要重新开始优化分析,通过如下命令读入优化数据库文件(Jobname.OPT):

命令: OPRESU

GUI 操作路径: Main Menu/Design Opt/Resume

数据读入后,指定优化类型,控制等,然后开始循环(对应于数据库的分析文件必须可用以完成优化)。用下列方法开始循环:

命令: OPEXE

GUI 操作路径: Main Menu/Design Opt/Run

## 参 考 文 献

- [1] 康国政, 阚前华, 张娟编著. 大型有限元程序的原理、结构与使用[M]. 2 版. 成都: 西南交通大学出版社, 2008.
- [2] 段进, 倪栋, 王国业著. ANSYS10.0 结构分析从入门到精通[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2006.
- [3] 张朝晖著. ANSYS12.0 热分析工程应用实战手册[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2010.
- [4] 王富耻, 张朝辉著. ANSYS10.0 有限元分析理论与工程应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [5] 龚曙光著. ANSYS 工程应用实例解析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.

# 反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为，歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396; (010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市海淀区万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036